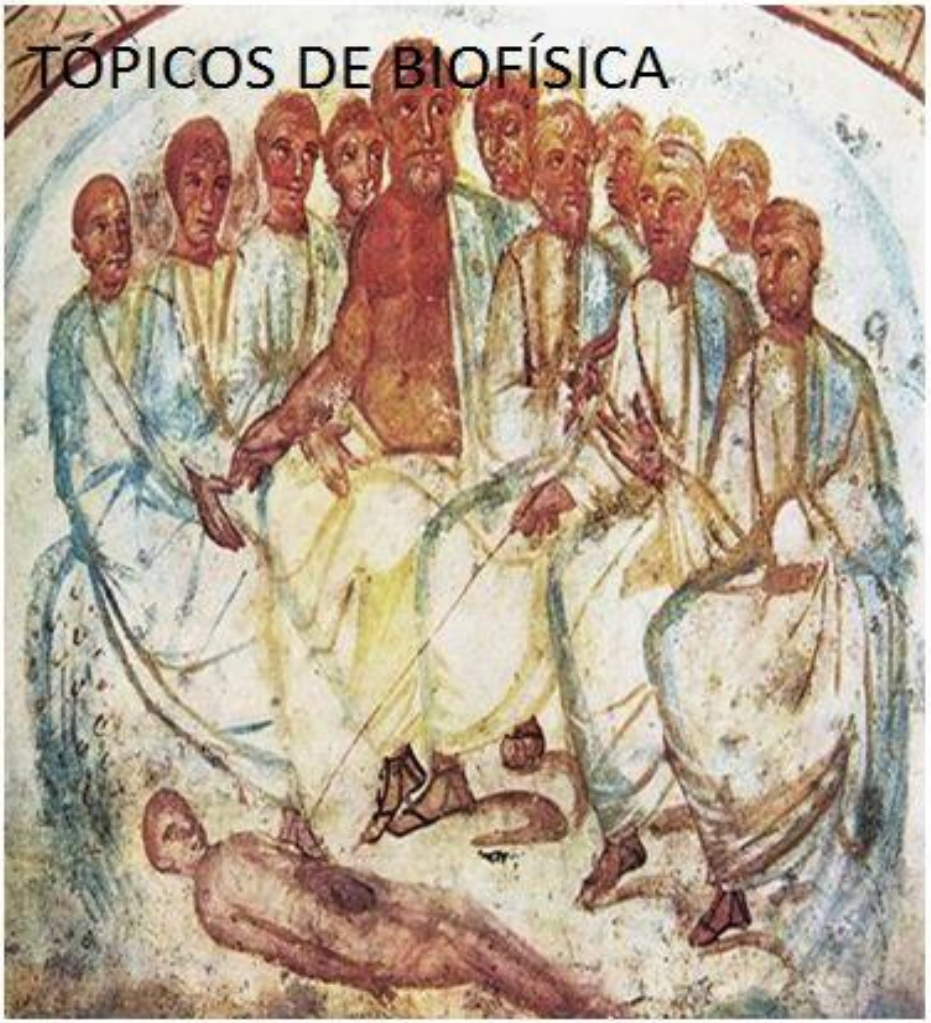
Luis O. Lara Estrella Antonio D´Alessandro Martínez

TÓPICOS DE BIOFÍSICA

EDICIONES NUEVA FÍSICA
CARACAS 2013
REVISIÓN: AGOSTO 2018

Luis O. L ara Estrella Antonio D´Alessandro M.



REVISIÓN: AGOSTO 2018

Hecho el Depósito de Ley
Depósito Legal: lf25220135743496

Primera Edición: TÓPICOS DE BIOFÍSICA (2013)
EDICIONES NUEVA FÍSICA

©Copyright by Antonio D'Alessandro y Luis Lara Estrella,

ISBN: 978-980-7565-01-1

Editado inicialmente (2005) como Biofisca Básica por

- SECCIÓN DE BIOFÍSICA Y BIOINGENIERÍA
- UNIDAD DE GESTIÓN EN TECNOLOGÍA EN SALUD DE LA UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR.

DIAGRAMACIÓN / TRATAMIENTO DE TEXTOS
Y DISEÑO DE LA PORTADA:
A. SALAZAR BUCCI

REVISIÓN DE TEXTOS:
LUXEN C. D'ALESSANDRO CÁCERES

EDICIÓN REVISADA: AGOSTO 2018

Portada: Lección de Anatomía con Aristóteles, fresco de la catacumba de la Vía Latina en Roma.

Índice general

Prólogo 5
Introducción 7

Capítulo I

Principios de Física y Química 9
¿Qué es la Física? 10
¿Qué es la Biofísica? 10
¿Qué es la Química? 12
¿Qué es la Fisiología? 12
Magnitudes 13
Magnitudes fundamentales 15
Magnitudes derivadas 20
Interacción gravitacional 29
Interacción electromagnética 31
Primera Ley de la termodinámica 32
Magnitudes químicas 39
Unidadades de concentración 42
Ósmosis 58
Muy Interesante: Diálisis 60
Tonicidad 62
Ley de la difusión (Ley de Fick) 63
Índice de hidrógeno 68
Leyes de los gases 68
Ley de Boyle-Mariotte 73
Ley de Charles-Gay-Lussac 74
Ley de Gay-Lusac 74
Ley de Avogadro 75
Ley de Dalton 75

Muy Interesante: Algunas aplicaciones de la conservación de la energía en fisiologìa 78
Ley de Henry 77
Ley de Graham 79
Sistema fisiológico 82
Problemas y Preguntas 89
Apéndice I
Composición de algunas soluciones empleadas como sustitutivas del agua y electrolitos 105
Apéndice II
Condiciones físicas para los gases 107
Apéndice III
¿Qué es la Biofísica? 112
Apéndice IV
Los seres vivos como sistemas materiales y la vida como producto de procesos físicos y químicos de la Tierra 121
Apéndice V
Termodinámica biológica 129
Apéndice VI
Experimentos sobre el origen de la vida 133
Apéndice VII
Cálculo de la conductividad de una solución electrolítica 147
Apéndice VIII
Tablas 151

Capítulo II

Crecimiento de estructuras biológicas 157
Concepto de semejanza 158
Fortaleza relativa de dos individuos pertenecientes a especies diferentes 167
Límites estáticos y dinámicos 169
Factor de viabilidad celular 170
Leyes de Kleiber 173
Velocidad de carrera 178
Velocidad de la marcha 180
Ley de Escala para salto vertical 181
Ley de Escala de la frecuencia cardiaca 183
Referencias 186
Problemas 188
Apéndice I: Tabla Crecimiento Proporcional de Estructuras 195
Muy Interesante: Velocidad de arranque y velocidad sostenida 196

Capítulo III

Estudio de la Bioelectricidad 199
Origen de los potenciales bioeléctricos 201
Rol de la electricidad en la comunicación intercelular 203
Muy Interesante: Comunicación neurohormonal 205

Capítulo IV

Origen de los fenómenos eléctricos 209
Los átomos de la naturaleza 212
Formación de cargas en cuerpos macroscópicos 218
Principio de superposición 218

Capítulo V

Definición de corriente eléctrica 221
Definición de flujo y densidad de flujo 222
Cuantificación de la corriente eléctrica 224
Conductividad en medios electrolíticos 226
Definición de movilidad iónica 228
Ecuación de Nernst-Planck 231

Capítulo VI

Integración de la ecuación de Nernst-Planck 233
Otras deducciones de la ecuación de Nernst 235
Ecuación de Henderson 237
Ecuación de Goldman, Hodgkin y Katz 239
Ecuación de la conductancia 242
Equilibrio de Gibbs-Donnan 243
Problemas 245
Bibliografía de los Capítulos 3,4,5,6 247

Prólogo

El libro Tópicos de Biofísica (anteriormente denominado Biofísica Básica) constituye un aporte a la enseñanza de la Biofísica (al entender de los autores, la Física de la Vida) y trata algunos de los principios básica de ésta ciencia a nivel fenomenológico y matemático elemental. Consta de seis capítulos, numerosos apéndices y problemas propuestos por capítulo. Los capítulos son: Principios de Física y Química, Crecimiento de Estructuras Biológicas, Estudio de la Bioelectricidad, Origen de los Fenómenos Eléctricos, Corriente Eéctrica y Potenciales Electroquímicos.

El primero de los capítulos discute los principios de Física y Química más relevantes en las Ciencias de la Vida disertando sobre tópicos como las magnitudes físicas y químicas, discutiendo exhaustivamente el concepto de concentración de una sustancia, los fenómenos de difusión y ósmosis, hasta las leyes de los gases, pasando brevemente por la discusión del concepto de sistema fisiológico y su control.

El segundo capítulo aborda algunos de los principios físicos y geométricos que operan en los seres vivos obteniéndose las leyes de escala del crecimiento de una estructura biológica, de la velocidad de carrera y marcha, del cónsumo de energía basal, expresado mediante las leyes de Kleiber.

El resto de los capítulos discute las leyes físicas básicas que determinan el flujo de iones a través de las membranas celulares, obteniéndose finalmente la ecuación de Nernst-Planck cuya integración conduce a las expresiones para los potenciales electroquímicos que son fundamentales para explicar el comportamiento electroquímico de la célula y que constituyen la base para comprender el potencial de reposo, el potencial de acción y su propagación que permite la comunicación y coordinación de las funciones orgánicas.

Los Autores

PD: El Profesor Luis Orlando Lara Estrella falleció en los Estados Unidos de América el 21 de febrero de 2013, se especializó en Biofísica y en Ingeniería Biomédica, Profesor Titular (Jubilado) de la Universidad Simón Bolívar (USB) donde se desempeñó exitosamente como Jefe del Departamento de Tecnología de Procesos Biológicos y Bioquímicos, Jefe de la Sección de Biofísica y Bioingeniería y Jefe de la Unidad de Gestión de Tecnología en Salud y Decano. En la Facultad de Medicina de la Universidad Central de Venezuela fue Profesor de la extinta Cátedra de Física de la Escuela Básica de Medicina, de la Escuela de Salud Pública y de la Cátedra de Fisiología de la Escuela Luis Razetti. La USB le confirió el Premio "Simón Rodríguez" a la Excelencia académica en el año 2012. Además de su intensa labor pedagógica evidenciada en las diversas asignaturas que diseñó y dictó con gran pasión y elevadas dotes didácticas, el Dr. Luis Lara Estrella desempeñó un papel relevante en el desarrolló de Programas de Ingeniería Clínica en Instituciones de Salud de Venezuela.

Profesor Antonio D'Alessandro Martínez

Capítulo I

Principios de física y química

I. INTRODUCCIÓN: IMPORTANCIA DE LOS PRINCIPIOS FÍSICOS Y QUÍMICOS EN FISIOLOGÍA

Sobre la importancia que poseen los principios físicos y químicos en la interpretación de los fenómenos biológicos existen dos tendencias extremas, una el fisicismo (mecanicismo) y la otra el vitalismo. El primero plantea que los fenómenos biológicos se reducen a principios de Física y Química. El segundo plantea que los fenómenos biológicos son en principio inaccesibles a la Física y a la Química ya que existe una "fuerza vital" que no se somete a una interpretación física; esta última tendencia conduce a a la teología. Existen posiciones intermedias, por ejemplo, la sostenida por Stahl (citada por Helmholtz) quien escribía: "las fuerzas que actúan sobre un cuerpo vivo son fuerzas físicas y químicas de los órganos y sustancias, pero una determinada alma viva o fuerza viva puede sujetar o liberar esa actividad...". Otro punto de vista importante es el sostenido por Lenhinger (en el libro: *Bioquímica. Las bases moleculares de la estructura y función celular,* 1978): "...Y ello se debe a que las moléculas que integran los organismos vivos no solamente se rigen por todos los principios físicos y químicos que gobiernan el comportamiento de todas las moléculas, sino que, además ejercen acciones mutuas de acuerdo con otro conjunto de principios a los cuales nos referiremos de modo colectivo como la lógica molecular de la vida...". Y añade: "Estos principios no incluyen necesariamente ninguna ley o fuerza física nueva o todavía por descubrir. Deben considerarse más bién un conjunto único de reglas fundamentales que gobiernan la naturaleza, la función y las interacciones de los tipos específicos de moléculas presentes en los organismos vivos y les dotan de la capacidad de organizarse y replicarse por sí mismos".

Por otra parte, los avances de la Biología y de la Medicina se han alcanzado en virtud de la aplicación de muchos principios de la Física y la Química que han permitido aumentar la comprensión de diversos fenómenos que ocurren a nivel molecular que se traducen finalmente en el diseño de una terapeútica certera. Además, los avances en la aplicación de los principios de la física y la química han permitido el surgimiento de una tecnología en capacidad de estudiar cada vez con mayor precisión las diversas estructuras de los seres vivos y su funcionamiento (el estetoscopio, el electrocardiógrafo, rayos X, tomografías por resonancia magnética, tomografía por emisión de positrones, etc.); técnicas terapéuticas como la radioterapia, la quimioterapia, el uso del láser como instrumento quirúrgico y como acción fotobiológica (laserterapia o terapia fotodinámica) y fotoquímica; técnicas bioanalíticas como el radioinmunoensayo, inmunofluorescencia, electroforesis e intrumentos como el osmómetro y el phmetro.

II. ¿QUÉ ES LA FÍSICA?

Es la ciencia que estudia la estructura y propiedades de la materia, de la energía y de los campos a todo nivel. De esta definición se concluye que no existen límites en la aplicación de la Física, ella puede abordar tanto los fenómenos de la naturaleza inanimada como de la viviente (ver fig.1).

III. ¿QUÉ ES LA BIOFÍSICA?

Según Volkenshtein (1985) la Biofísica "es la Física de los fenómenos vitales, estudiados a todos los niveles, comenzando por las moléculas y las células y terminando con la Biosfera en su conjunto". Para muchos investigadores (entre ellos el propio Volkhenshtein), la Biofísica no es una rama auxiliar de la Biología, sino una parte de la Física. Sin embargo, como ella tiene por objeto de estudio a los seres vivos, utilizando para ello técnicas y métodos de la Física puede ser clasificada, bién como una rama de la Biología, por cuanto su objeto de estudio son los seres vivos o también como una rama de la Física, ya que los métodos y técnicas que utiliza pertenecen a la Física. El desarrollo de la Biofísica ha sido tan

Fig. 1: Las diversas ramas de la Biofísica.

vertiginoso, que se piensa que en los próximos años se conforme como una ciencia aparte de la Fisica y la Biologia. La Biofisica hace uso de los principios fisicos y quimicos que permiten describir el funcionamiento de los seres vivos, a cualquier nivel de complejidad. (Ver fig.1).

IV. ¿QUE ES LA QUÍMICA?

Es la ciencia que estudia la estructura y los cambios de las capas electrónicas de los átomos y moléculas. Desde este punto de vista la Quimica según muchos investigadores, puede interpretarse, en la actualidad haciendo uso de la epistemologia (teoria del conocimiento) como una parte de la Fisica.

V. ¿QUÉ ES LA FISIOLOGÍA?

La Fisiologia es una rama de la Biologia que estudia el funcionamiento de los seres vivos a cualquier nivel de complejidad. Ella se puede dividir en: Fisiologia Animal y Fisiologia Vegetal. La Fisiologia Humana forma parte de la Fisiologia Animal. Para el abordaje adecuado de los diversos fenómenos fisiológicos se requiere del uso de varias ramas de la ciencia, entre las que se incluyen la biofisica, la bioquimica y la farmacologia.

VI. LA BIOFÍSICA Y SU CLASIFICACIÓN

La Biofisica estudia un conjunto de fenómenos de diversos niveles de complejidad y de acuerdo con ello se puede dividir en:

a) Biofísica molecular

Estudia el comportamiento fisico-quimico de las biomoléculas que están presentes en los seres vivos. La biofisica molecular aborda, entre otros, los siguientes problemas: estudio de la morfologia de las macromoléculas, de sus modificaciones bajo la acción de agentes externos, de sus propiedades electrónicas e iónicas y de las reacciones entre ellas y con reactivos diversos.

b) Biofísica celular, de tejidos y de órganos (biofísica fisiológica)

Explica los diversos fenómenos fisiológicos sobre una base fisicoquimica. Dentro de esta rama se incluye el estudio de la generación y transmisión del impulso nervioso, de la bioenergética celular y de tejidos (por ejemplo, la termodinámica muscular), de los fenómenos fotoquimicos como la visión y la fotosintesis y la biofisica de membranas biológicas, de la circulación sanguinea y las propiedades fisicas de los vasos, de la audición y fonación, de la electrocardiografia y electroencefalografia.

Otra parte muy importante es la Biofisica de las radiaciones que incluye a la radiobiologia, la cual estudia las interacciones de las radiaciones con la materia viva. En algunos paises, la Biofisica de radiaciones se conoce también como Fisica Médica (ver fig. 2). Ésta trata fenómenos que ocurren en radioterapia, medicina nuclear, electroterapia, radiodiagnóstico, laserterapia (efectos fotobiológicos de la radiación coherente), dosimetria y protección radiológica, ultrasonido terapéutico y diagnóstico, gammagrafia, tomografia por emisión de un solo fotón, rayos X, infrarrojos (termografia), resonancia magnética, diatermia (hipertermia producida por la aplicación de microondas a un sujeto), tomografia axial computada, tomografia por emisión de positrones, etc.

c) Biofísica Teórica

Elabora modelos matemáticos de los diversos sistemas fisiológicos (por ejemplo, modelos fisicos-matemáticos del sistema cardiovascular, y de la propagación del impulso nervioso, etc.). La Biofisica Teórica además estudia los procesos irreversibles y oscilatorios presentes en los sistemas biológicos Aplica la teoria de la información y la cibernética (sistemas de control) a la organización biológica a todos los niveles. Otro campo de estudio es la dinámica no lineal o caos determinista, que en los últimos diez años ha venido ocupando un papel relevante en la Fisiologia porque se ha descubierto que un conjunto de fenómenos biológicos, tales como la variación de la frecuencia cardiaca, en la normalidad o en ciertas patologias, presenta una periodicidad oculta.

VII. MAGNITUDES

Definiremos magnitud como cualquier caracteristica de un objeto animado o inanimado que pueda ser medida. Hay magnitudes fisicas, magnitudes quimicas, o más especificamente magnitudes termodinámicas,

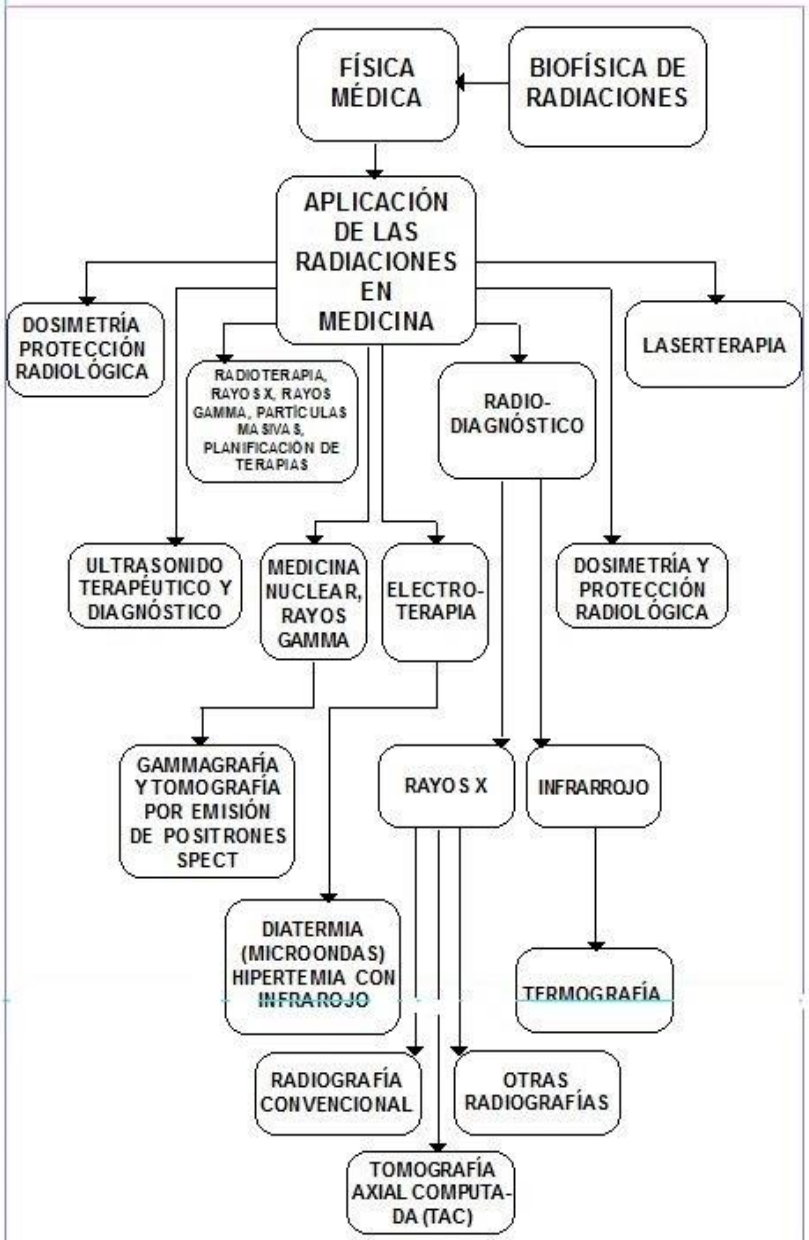


Fig. 2: La Física médica y sus diversas aplicaciones en Medicina.

magnitudes eléctricas, etc. Las magnitudes (denominadas también por algunos autores medidas o cantidades) poseen un valor o dimensión (magnitud propiamente dicha) y una unidad. Por ejemplo, el espesor de una membrana celular es aproximadamente 100Å. El valor es 100 y la unidad es el Ángstrom. El valor carece de significado, a menos que se especifique la unidad. Existen cuatro sistemas de unidades que se construyen con magnitudes fundamentales o bases (masa, longitud y tiempo). Las unidades del SI (Sistema Internacional), son además de las que aparecen en la tabla I, el amperio, el grado Kelvin, la bujia o candela, y el mol.

TABLA I
SISTEMA DE UNIDADES

	*SI**	*MKS*	*cgs*	*Británico*
Longitud	Metro (m)	Metro (m)	Centimetro (cm)	Pie (P)
Masa	Kilogramo (kg)	Kilogramo (kg)	Gramo (g)	Libra (lb)
Tiempo	Segundo (s)	Segundo (s)	Segundo (s)	Segundo (s)

* El SI tiene cuatro unidades base adicionales.

VIII. MAGNITUDES FUNDAMENTALES

Entre ellas se encuentran la longitud, la masa, el tiempo y la temperatura.

a) La longitud

La letra (L) representa a la magnitud longitud; puede tratarse de la longitud de una fibra muscular (esquelética, lisa o cardiaca). Las unidades que se emplean son metros (m), centimetros (cm), micras, nanómetros (nm) o milimicras, Ángstroms (Å), etc. La unidad empleada depende del tamaño del objeto al cual se le mide su longitud.

$$1\ nm = 10^{-9} m$$
$$1\ Å = 10^{-10}\ m$$

Así que:

$$1nm = 10\ Å$$

El tamaño de un núcleo atómico es del orden de 10^{-15} m (1 fentómetro, denominado también en Física nuclear 1 Fermi); el espesor de un micro-filamento presente en una fibra muscular esquelética es de 4 x 10^{-9}m (4 nm). El espesor de la membrana celular es 10^{-8} m (100 Å). La longitud de la molécula de hemoglobina es 7. 10^{-9} m (7 nm). Para algunas longitudes representativas en metros, ver las figs. 3 y 4.

Núcleo atómico	10^{-15}	Huevo de un erizo de mar	7×10^{-5}
Diámetro del átomo de sodio	10^{-11}	Diámetro de una ameba gigante	2×10^{-4}
Enlace C-C	$1,5 \times 10^{-10}$	Crustáceo pequeño	10^{-3}
Diámetro del DNA	2×10^{-9}	Diámetro de un huevo de avestruz	4×10^{-2}
Espesor de un microfilamento	4×10^{-9}	Rata	10^{-1}
Hemoglobina	7×10^{-9}	Hombre	$1\text{-}2 \times 10^{0}$
Membrana celular	10^{-8}	Ballena Azul	3×10^{1}
Diámetro de un virus pequeño	2×10^{-8}	Puente de Brooklyn	10^{3}
Diámetro de una bacteria pequeña	2×10^{-7}	Diámetro de la Tierra	$1,3 \times 10^{7}$
Longitud de onda de la luz visible	$4\text{-}7 \times 10^{-7}$	Diámetro del Sol	$1,2 \times 10^{9}$
Diámetro de una mitocondria	$0,5\text{-}1 \times 10^{-6}$	Distancia Tierra-Sol	$1,3 \times 10^{11}$
Diámetro de una bacteria grande	10^{-6}	Diámetro de nuestra galaxia	10^{22}
Diámetro cél. hepáticas mamífero	2×10^{-5}	Distancia a las galaxias más lejanas	10^{23}

Fig. 3. Longitudes representativas en metros. Tomado de Ref. [13]

b) La masa

Es una medida de la cantidad de materia. Se puede expresar en Kg-masa, g-masa, libra-masa, onza-masa, etc.

Existe una fórmula que relaciona a una longitud (específicamente la altura H de un sujeto) y a su masa corporal. Esta es la fórmula de Dubois y Dubois que permite calcular el área superficial corporal del sujeto:

$$S = 0,007184 \times M^{0,425} \times H^{0,725}$$

donde la masa (M) está en kilogramos, la altura (H) en centímetros y el área superficial (S) corporal en m^2.

La masa de un electrón es del orden de:

$$9 \times 10^{-31} \text{ Kg}$$

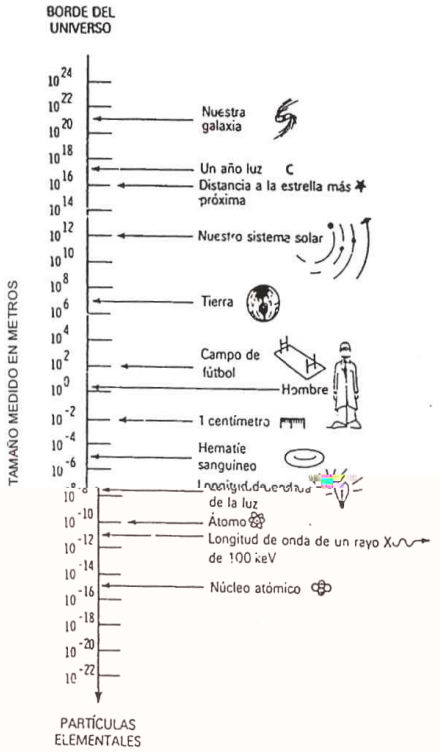


Fig. 4: La materia de nuestro entorno está compuesta por objetos cuyos tamaños varían enormemente. Tan grande es el rango de tamaños que apenas se puede representar con la nomenclatura aritmética. Se utiliza la notación en potencias de diez porque se necesitan unos cuarenta órdenes de magnitud para cubrir el rango de la materia que conocemos. Tomado de Ref. [4].

La masa de un hombre es del orden de 70 Kg

Actualmente se emplea una unidad de masa muy pequeña que es el Dalton (D) para expresar la masa. El Dalton es el nombre que se le ha dado a la Unidad de Masa Atómica (1 UMA) y equivale a:

$$(1\text{g} / N_A) = 1,66 \times 10^{-24} \text{ g}$$

donde N_A es el número de Avogadro y corresponde a $6,023 \times 10^{23}$ partículas. La fig. 5 presenta los valores de algunas masas representativas en kilogramos.

Electrón	9×10^{-31}
Protón	2×10^{-27}
Átomo de oxigeno	3×10^{-26}
Molécula de insulina (proteina pequeña)	10^{-23}
Molécula de penicilina	10^{-18}
Ameba gigante	10^{-8}
Hormiga	10^{-5}
Colibri	10^{-2}
Perro	10^{1}
Hombre	10^{2}
Elefante	10^{4}
Ballena azul	10^{5}
Buque petrolero	10^{8}
Luna	7×10^{22}
Tierra	6×10^{24}
Sol	2×10^{30}
Nuestra galaxia	2×10^{41}

Fig. 5. Masas representativas en kilogramos. Ref. [13].

c) El tiempo

El tiempo tiene como unidades el segundo (s), el minuto (min), horas (h), etc. La unidad utilizada en la descripción de los eventos eléctricos que ocurren en la membrana celular es el milisegundo (ms). El potencial de acción (espiga) de una neurona dura aproximadamente 1 ms.

La duración tipica de un registro electrocardiográfico es cerca de 0,8s y por ello la frecuencia cardiaca de ese sujeto es:

$$f = (1 / 0{,}8\ s) = (60 / 0{,}8)\ \text{latidos/ min} = 75\ \text{lat / min.}$$

Existen fenómenos de una duración mucho más corta y por ello se emplean el microsegundo (ms), el nanosegundo (ns), etc. El tiempo de gestación de un mamífero pequeño es 4×10^7s.

Algunas equivalencias son:

$$1\text{min} = 60\ \text{s}$$

$$1\text{s} = 10^3\ \text{ms}$$

En la fig. 6 se presentan los valores de algunos tiempos representativos en segundos.

Fenómenos nucleares	$10^{-23} - 10^{-10}$
Fenómenos químicos: absorción de luz, excitación electrónica	$10^{-15} - 10^{-9}$
Fenómenos químicos	$10^{-9} - 10^{-6}$
Cadenas de reacciones bioquimicas	$10^{-6} - 10^{2}$
Contracción rápida de un músculo estriado (parpadeo)	10^{-1}
División celular más rápida	5×10^{2}
Tiempo de generación de una bacteria tipica	3×10^{3}
Tiempo de generación de un protozoo tipico	10^{5}
Tiempo de generación de un mamifero pequeño	4×10^{7}
Vida media de un mamifero grande	$4 \times 10^{8} - 4 \times 10^{9}$
Vida media de un lago	$10^{10} - 10^{12}$
Era de los mamiferos	3×10^{15}
Era de los vertebrados	10^{16}
Edad de la vida	$> 10^{17}$
Edad de la Tierra	2×10^{17}

Fig. 6. Tiempos representativos en segundos. Ref. [13].

d) La temperatura

Es una medida de la energia cinética promedio de los átomos que constituyen el cuerpo.

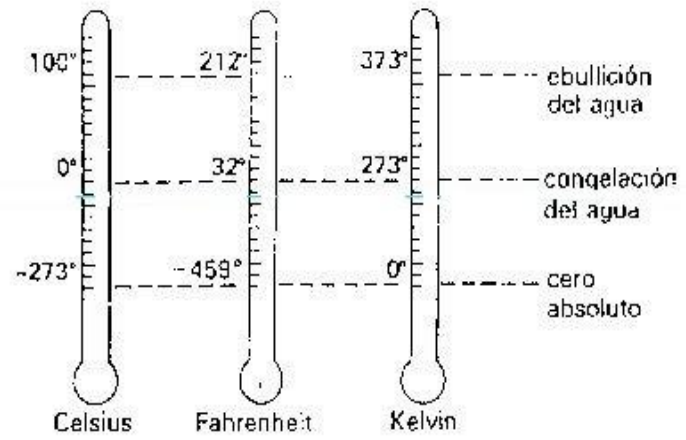


Fig. 7: Las tres escalas principales para medir la temperatura.

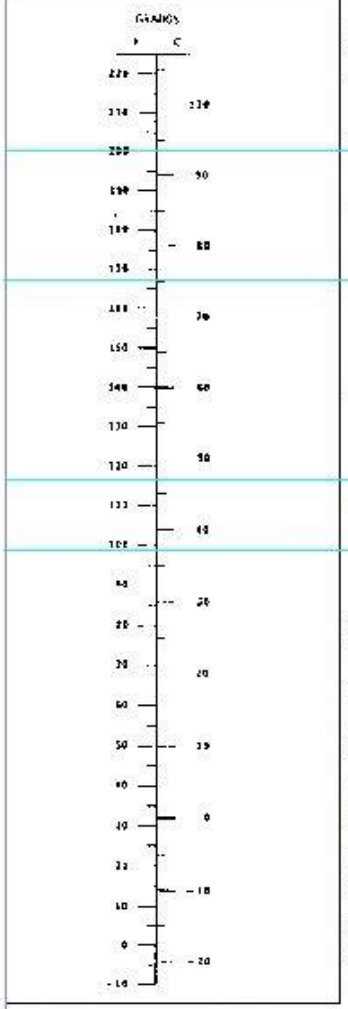


Fig. 8: Comparación de las temperaturas Fahrenheit y Celsius. Para convertir grados Fahrenheit (°F) en grados Celsius (°C) restar 32 y multiplicar por 5/9. Para convertir °C en °F, multiplicar por 9/5 y añadir 32. Ref. [11]

En cuanto a la temperatura, las escalas más utilizadas son la centígrada (°C), Fahrenheit (° F) y Kelvin (K) o absoluta. Se puede pasar de una escala a otra utilizando las siguientes relaciones:

$(F-32) / 180 = °C / 100$ y despejando °C y °F respectivamente obtenemos:

$$°C = (5/9)(°F - 32)$$

$$° F = (9/5)\,°C + 32$$

La equivalencia entre grados Kelvin y grados centígrados es la siguiente:

$$T(K) = T(°C) + 273$$

Cuando se está a una temperatura de 0 °C ello equivale a 32 °F; cuando se está a 100 °C los grados °F son 212.

Para tener un mapa térmico del cuerpo humano, determinando las diversas temperaturas, con el fin de detectar tumores y el flujo sanguíneo se utilizan las técnicas de termografía de infrarrojo y microondas. El cuerpo humano produce radiación electromagnética en el infrarojo y microondas, (ley de Stefan-Boltzmann) y la frecuencia de la radiación en el máximo de la emisión de la radiación es directamente proporcional a la temperatura (Ley de Wien). Las figuras 7 y 8 presentan una comparación entre las diversas escalas de temperatura.

IX. MAGNITUDES DERIVADAS

Además de las magnitudes fundamentales, existen magnitudes derivadas que se obtienen de la combinación de las magnitudes fundamentales o magnitudes bases (ver fig. 9). Una de ellas es el área corporal de un sujeto que fue mencionada anteriormente. Otras son:

a) El volumen

Es una medida del espacio que ocupa un cuerpo. Las unidades de volumen (V) que se emplean son m^3, cm^3 (cc), litro (l), mililitro (ml), la onza-volumen, etc. Un ml es igual a 1 cm^3 y también igual a 20 gotas. Esta equivalencia es importante para el cálculo de la velocidad de goteo cuando se administra una determinada sustancia a un sujeto (solución glucosada, suero, plasma, sangre, medicamentos, etc.). Ver Tabla II.

b) La densidad

Se define como el cociente de la masa del objeto entre su volumen. Las unidades de densidad son muy variadas: Kg/m^3, g/cm^3, Kg/litro. La unidad Kg/litro es equivalente a g/cc como podemos constatar al hacer la reducción:

$$1\ Kg / litro = 10^3\ g / 10^3\ cc = 1\ g / cc$$

La densidad de la sangre es 1,05 g /cc a 37 °C y con un hematocrito

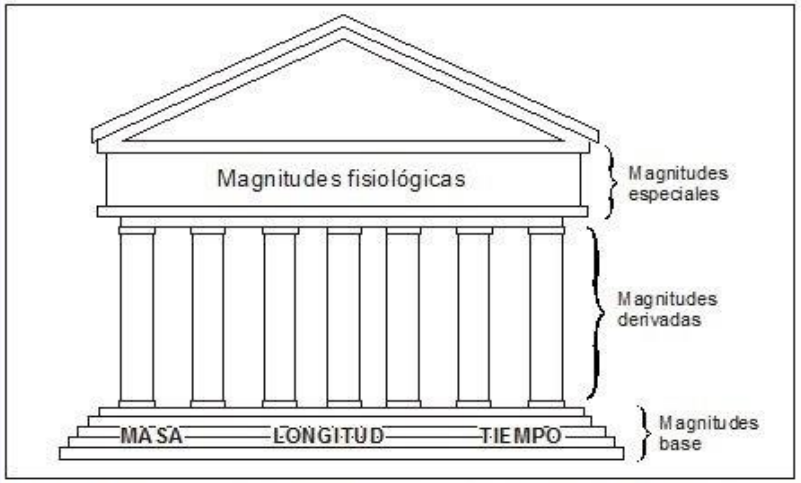


Fig. 9: Las magnitudes base soportan las magnitudes derivadas, que a su vez soportan las magnitudes especiales. Modificado de Ref. [4].

(concentración de células sanguineas) del 45%. Esto significa que si cambian estas condiciones, la densidad de la sangre variará.

TABLA II

ALGUNAS MAGNITUDES Y SUS UNIDADES [Ref. 11]

Notación	*Magnitud*	*Unidades*
L	Longitud	m, cm, nm, Å
M	Masa	Kg-m, g-m, libra-m
P	Peso	Kg-f, g-f, libra-f
t	Tiempo	min, s, ms, μs, ns
V	Volumen	m^3, cm^3, ml, litro
		$1cm^3 = 20$ gotas
D	Densidad	Kg/m^3, g/cm^3; Kg/ L
F	Fuerza	N, dinas, Kg-f

c) La velocidad

Es una medida de la rapidez con que un cuerpo cambia de posición respecto a un punto de referencia.

La velocidad es una magnitud de empleo constante en fisiología, por ejemplo, la velocidad de acortamiento de un músculo cuando se somete a la acción de un estímulo eléctrico o la velocidad del potencial de acción en un axón. Las unidades de la velocidad corresponden a las de longitud entre tiempo: m/s; cm/s, Km/h, millas/h. Específicamente la velocidad de conducción del potencial de acción de un axón varia entre 30 a 100 m/s dependiendo de su radio y de si está mielinizado (aislado eléctricamente) o no.

d) La aceleración

Es una medida de la interacción a distancia o de contacto entre cuerpos. También se define como la rapidez con que un cuerpo cambia de velocidad respecto al tiempo en un sistema de referencia. La aceleración (a) es una magnitud determinada por el cociente de la velocidad y el tiempo y por consiguiente sus unidades son, entre otras: m/s^2, cm/s^2, Km/h^2 y $millas/h^2$.

e) La fuerza

Es una medida de la interacción (a distancia o de contacto) entre cuerpos.

En términos elementales se define como masa por aceleración ($m \bullet a$). Sus unidades mas importantes son el Newton (N), la dina (d), el Kg-fuerza (kilopondio), el g-fuerza (pondio) y la libra-fuerza *(pound)*. En el idioma inglés no debe confundirse el término "pond" que significa gramo con el término *"pound"* que significa libra. Las unidades Kg-f y g-f son ampliamente usadas en cardiología, en el cálculo del trabajo ventricular.

f) El peso

En el campo gravitacional de la Tierra (con una gravedad promedio de $9{,}8\ m/s^2$), la masa es numéricamente igual al peso expresado en kilogramos-f o en gramos-f. Así, un cuerpo de masa 1 Kg-masa será atraído por el campo gravitacional terrestre con una fuerza igual a 1 Kg-fuerza. Las equivalencias más importantes son:

$$1\ Kg\text{-}f = 9{,}8\ N$$

$$1\ N = 10^5\ dinas$$

g) La tensión

Es la fuerza que genera una fibra muscular dividida por su longitud L. Se emplea esta magnitud en mecánica muscular. Por ejemplo, si un músculo es estirado pasivamente mediante la acción de un peso variable, la tensión que aparece en el músculo será:

$$T = K\,(L - Lo)^z$$

donde K, L, Lo y z son respectivamente, una constante, la longitud del músculo cuando está estirado, la longitud del músculo sin estiramiento y el exponente. Si $z = 1$, la expresión anterior se denomina ley de Hooke.

En las cavidades huecas del cuerpo (corazón, vasos, vejiga urinaria, útero, alvéolos, etc) aparecen tensiones elásticas parietales y en algunos

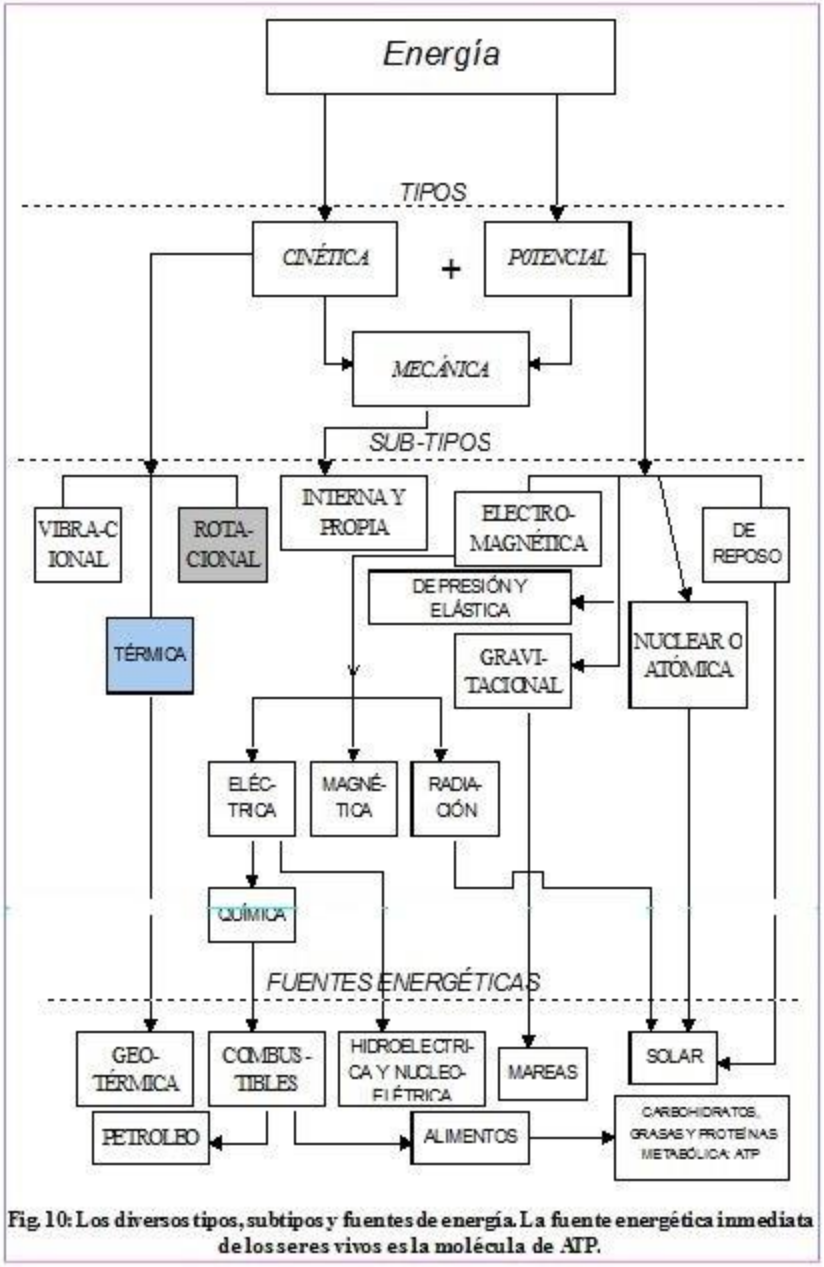


Fig. 10: Los diversos tipos, subtipos y fuentes de energía. La fuente energética inmediata de los seres vivos es la molécula de ATP.

casos tensiones superficiales en membranas líquidas, como la que recubre a los alvéolos, que obedecen a la ley de Laplace:

$$P_t \cdot R = n \cdot T \cdot h$$

que expresa el equilibrio de fuerzas que existen en esas cavidades.

Aquí, P_t es la presión transmural definida como:

$$P_t = P_i - P_e$$

donde P_i y P_e es la presión en el interior y en el exterior de la cavidad respectivamente; R es su radio de curvatura, T es la tensión, h el espesor de la pared y, n es un entero positivo que depende de la geometría de la cavidad.

Las unidades más utilizadas son N/m, D/cm o Kg – f / cm.

h) La energía

Su variación es la medida de la capacidad de un cuerpo para realizar trabajo (mecánico, químico, eléctrico, etc.) y/o para participar en intercambios térmicos.

En la naturaleza existen dos tipos de energía (ver fig. 10): energía cinética (E_c) y energía potencial (E_p). La energía cinética depende de la masa (M) y de la velocidad (v) y se expresa como:

$$E_c = (1/2)\, M\, v^2$$

Esta energía, se presenta muy frecuentemente como energía térmica, la cual es directamente proporcional a la temperatura. También puede aparecer como energía vibracional y rotacional de las moléculas.

Se puede calcular la energía cinética por unidad de volumen de la sangre, cuando fluye a través de un vaso sanguíneo como:

$$E_c / V = (1/2)\, D\, v^2$$

A la magnitud (E_c/V) se le denomina presión cinética, porque una superficie que enfrente al flujo de sangre soportará esta presión.

La energía potencial se presenta en varios subtipos: gravitacional, electromagnética, elástica, de presión, energía nuclear y energía de reposo.

Esta última es la energía que se produciría si la masa en reposo (m_o) de un cuerpo desapareciera por algún proceso físico (por ejemplo, una reacción nuclear). Dicha energía sería:

$$E_o = m_o c^2$$

esta relación es conocida como la fórmula de Einstein, y ella c representa a la velocidad de la luz en el vacío (300.000 Km/s). Un caso de interés médico se presenta en la medicina nuclear (aquellas técnicas diagnósticas que consisten en la administración de radiofármacos hacia el interior del cuerpo de un sujeto, con el fin de obtener imágenes, utilizando la radiación que proviene del cuerpo). Entre esas técnicas están la gammagrafía (cámara Anger), la tomografía por emisión de un sólo fotón (SPECT) y la tomografía por emisión de positrones (TEP). En esta última, se produce una aniquilación de un electrón y su antipartícula (el positrón) que genera energía electromagnética. Esta energía aparece en forma de dos fotones, cada uno de los cuales posee una energía igual a:

$$E = m_o^{electrón} c^2$$

donde $m_o^{electrón}$ es la masa en reposo del electrón o del positrón (son iguales).

La energía electromagnética puede presentarse a su vez en varias formas: energía eléctrica, magnética y energía de la radiación electromagnética. A su vez, la energía eléctrica puede aparecer como energía química acumulada en los enlaces químicos existentes en las moléculas, tal como la de ATP, que al hidrolizarse libera esta energía que es utilizada por el organismo para cumplir sus diversas funciones, entre ellas la contracción muscular, el transporte activo a través de la membrana celular, la síntesis de moléculas y el mantenimiento de la temperatura corporal. (Ver fig. 11, ciclo del ATP).

Debemos mencionar el hecho de que en una gran cantidad de libros de texto y artículos científicos se confunden tipos, subtipos, formas y fuentes de energía, situándolas todas en el mismo nivel de categorización, lo cual es obviamente incorrecto. Por ejemplo, el ATP es una fuente de energía química al igual que la gasolina, pero esas sustancias no son energía química, simplemente la contienen.

La energía mecánica es la suma de la energía cinética y la potencial:

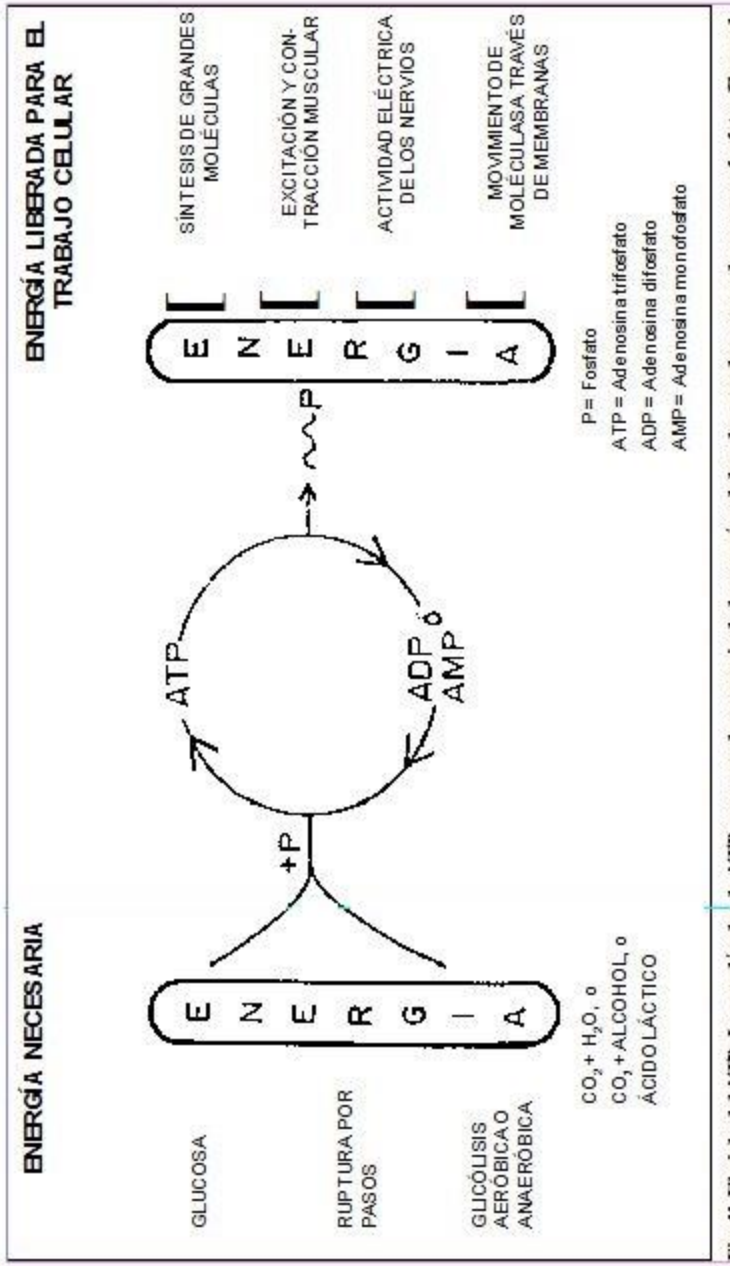


Fig. 11: El ciclo del ATP: Las moléculas de ATP, que son el reservorio de la energía celular, desprenden uno o dos grupos fosfatos liberando energía de los enlaces para efectuar el trabajo celular. A la derecha se muestran algunas de las funciones en las que se utiliza esta energía. Los compuestos ADP y AMP, pobres en energía, se transforman de nuevo en ATP por la adición de uno o dos grupos fosfatos. La energía para el ciclo se obtiene de la ruptura de la molécula de glucosa.

$$E_m = E_c + E_p$$

Entre las unidades de energía están: el Joule (MKS), Ergio (CGS) y la Caloría. Una caloría (o caloría gramo) es igual a 4,18 Joules, y se define como la cantidad de energía necesaria para elevar en un grado centígrado la temperatura (entre 14,5 y 15,5 °C) de un gramo de agua. En bioenergética se emplea como unidad la Kilocaloría (Kcal) o gran caloría (o caloría kilogramo), que es igual a 1.000 calorías. También es denominada caloría dietética. Es la cantidad de energía necesaria para elevar en un grado centígrado (entre 14,5 y 15,5 °C) la temperatura de 1 Kg de agua. Existen otras unidades de energía como el eletrón-voltio, que es una unidad que se emplea en Física Médica.

$$1eV = 1{,}6 \times 10^{-19} \text{ Joules}$$

El proceso de ionización de una molécula de agua (extracción de un electrón) requiere de una energía de aproximadamente 16 eV. Este valor divide a las radiaciones en ionizantes ($E_{fotón} > 16$ eV) tal como los rayos X y rayos gamma; y en no ionizantes ($E_{fotón} < 16$ eV) tal como la radiación perteneciente al espectro óptico (ultravioleta, luz visible e infrarrojo) así como las microondas y las ondas de radio. Si se requiere el valor de la energía necesaria para ionizar un mol de moléculas se emplea el KiloJoule (KJ):

$$1 \text{ Kcal / mol} = 4{,}3365 \times 10^{-3} \text{ eV/ molécula}$$

$$1 \text{ Kcal / mol} = 4{,}18 \text{ Kjoule / mol}$$

La energía recibida por un sujeto correspondiente a la radiación no ionizante, entre la unidad de área corporal recibe el nombre de dosis absorbida y su unidad estandar es el joule / m^2. En el caso de la radiación ionizante la dosis absorbida se mide como energía / masa del sujeto. Existen varias unidades de dosis absorbida para la radiación ionizante:

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ ergios / g} \; ; \; 1 \text{ gray} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ joule / Kg.}$$

La fig. 12 presenta los valores aproximados de la energía relacionados con diversos casos.

VALORES APROXIMADOS DE LA ENERGIA ASOCIADA CON DIVERSOS CASOS Y FENÓMENOS. Ref. [13]

Descripción	*Energía (J)*
Energía en forma de ondas de radio emitida por la galaxia durante su vida	10^{59}
Energía de rotación de la Vía Láctea	10^{52}
Energía liberada en la explosión de una supernova	10^{44}
Energía de rotación del Sol	10^{36}
Energía de rotación de la Tierra	10^{29}
Energía del Sol que incide por año sobre la Tierra	
Necesidades alimenticias anuales de la raza humana	10^{19}
Consumo anual de energía de combustible en Estados Unidos de América	
Energía liberada durante las erupciones de Krakatoa (1883)	10^{18}
Energía liberada por una bomba de fusión de 15 megatones	10^{17}
Producción anual de energía eléctrica de grandes centrales	10^{16}
Energía térmica en una tonelada de carbón	10^{10}
Energía cinética de grandes aviones a reacción	10^{9}
Consumo medio diario de energía en forma de alimento de un ser humano adulto	10^{7}
Energía cinética de un jonrón (béisbol)	10^{19}
Trabajo realizado por el corazón humano en cada latido	0,5
Descarga de una neurona	10^{-10}
Energía típica de un protón en un núcleo	10^{-13}
Energía típica de un electrón en un átomo	10^{-18}
Energía para romper un enlace en el DNA	10^{-20}

Fig. 12.

La energía permite describir interacciones entre cuerpos. En Fisiología existen dos interacciones importantes, la gravitacional (descrita por la energía gravitacional) y la electromagnética (descrita por la energía electromagnética). Existen múltiples ejemplos de estos tipos de interacciones en Biología y Medicina (Ver D'Alessandro Martínez, A; Michinel, J. L. y Ortega S., H., *Introducción a la Biofísica,* Cap. 2, EBUC, 2002). A continuación mencionaremos algunos ejemplos:

INTERACCIÓN GRAVITACIONAL

Entre muchas situaciones, las siguientes están influenciadas por la gravedad: la estructura de los huesos, el límite de la masa muscular de un individuo, el límite de su estatura corporal, sus variables cardiovasculares y pulmonares, la velocidad de sedimentación de los glóbulos rojos, etc.

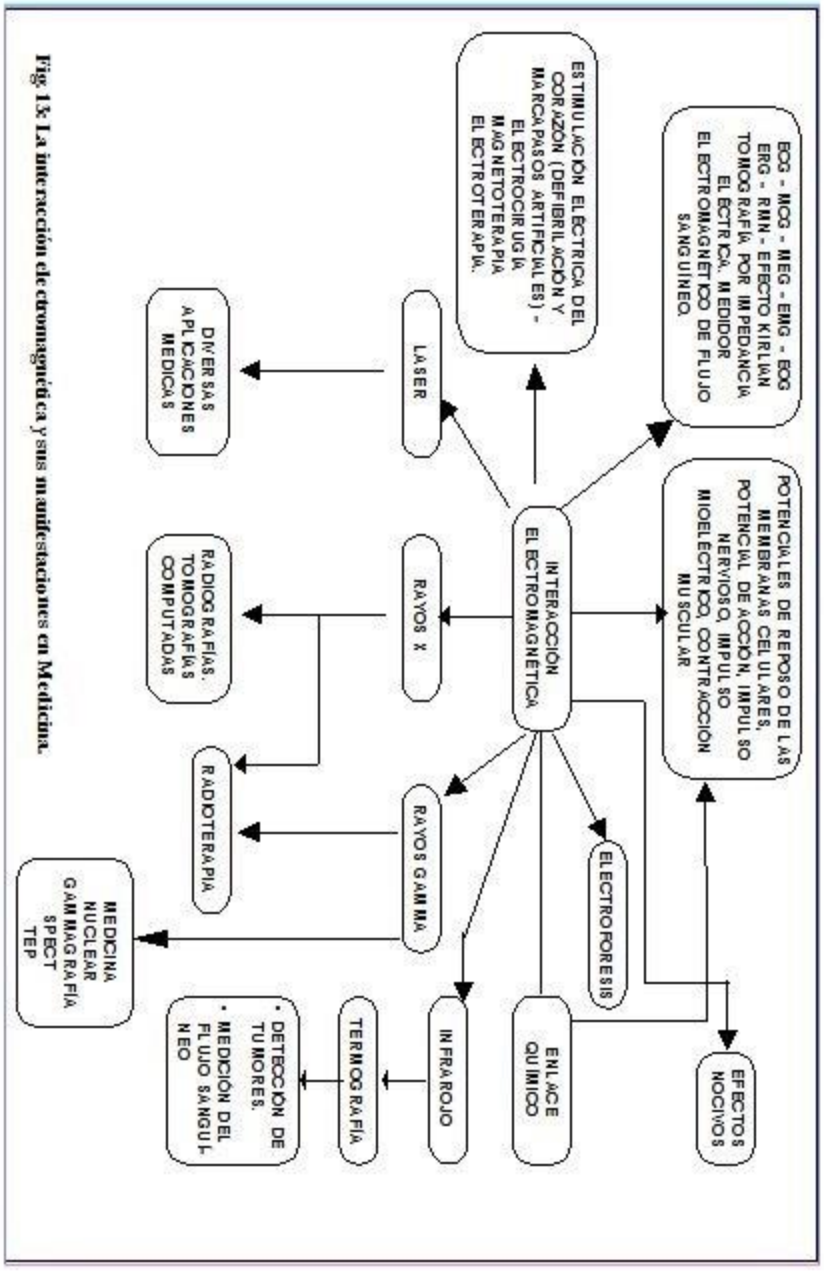


Fig. 13: La interacción electromagnética y sus manifestaciones en Medicina.

INTERACCION ELECTROMAGNETICA

Las interacciones electromagnéticas permiten explicar la energía acumulada en los enlaces químicos, el transporte de iones a través de las membranas celulares, la electrocardiografía, la electroforesis, la producción de rayos X y gamma, entre otros fenómenos. La fig. 13 representa algunos de los acontecimientos en donde está involucrada la interacción electromagnética.

h.1) Propiedad de la energía

Estas propiedades son:

1. Diversidad de Formas

Unas de las propiedades de la energía es que aparece con diversas formas (tipos y sub-tipos) en la naturaleza, tanto en los procesos que ocurren en los objetos inanimados como en la materia viva. Ver la figura 10.

2. Transformación de unas formas en otras

La energía que proviene de la hidrólisis de los enlaces de ATP es energía química que se transforma en el desplazamiento relativo (energía cinética) de las proteínas contráctiles presentes en las fibras musculares. También es posible transformar unas formas de energía potencial en otras.

3. Fijado el sistema de referencia, la energía se conserva

La formulación clásica de esta propiedad está representada por el Principio de Conservación de la Energía Total: La energía total de un sistema aislado ni se crea ni destruye, sólo se transforma de unas formas a otras.

Los valores de los distintos tipos de energía (cinética y potencial) dependen del sistema de referencia. La energía cinética depende del sistema de referencia porque la velocidad depende de él. La energía potencial también depende del sistema de referencia. Una vez que el sistema de referencia se fija, la energía total (sistemas+alrededores) se conserva y así la energía total justo al final de un proceso debe ser igual a la energía total justo al inicio del mismo. Esta es la ley general de la conservación de la energía y es válida siempre que no cambiemos el sistema de referencia durante la ocurrencia del fenómeno. Si un individuo acumula energía en forma metabólica (energía acumulada en los enlaces

de ATP), ocurre que si realiza un determinado ejercicio la cantidad de la energia gastada por el sujeto $\Delta E_s = E_{is} - E_{fs}$ (cambio de energia metabólica) debe aparecer como trabajo y calor, o equivalentemente como el cambio de energia de los alrededores $(-\Delta E_a)$. Asi:

$$\Delta E_s = -\Delta E_a$$

y entonces: $$E_s + E_a = \text{constante}.$$

Esta es una ley fundamental de la naturaleza que se aplica tanto al mundo inanimado como a los seres vivos. Esa ley se puede representar matemáticamente mediante el teorema del trabajo y la energia; y macroscópicamente (utilizando variables termodinámicas) mediante la primera ley de la termodinámica.

Teorema del trabajo y la energía

El trabajo total W_t realizado sobre un cuerpo es igual a la variación de su energia cinética ΔE_c:

$$W_t = \Delta E_c$$

El teorema también se puede expresar como:

$$W_{nc} = \Delta E_m$$

El trabajo de las fuerzas no conservativas sobre un sistema es igual a su variación de energia mecánica.

Este teorema permite calcular el trabajo cardiaco, el área del orificio de las válvulas cardiacas y el Principio de Bernoulli, este último de amplio uso en Fisiologia Cardiovascular y Respiratoria, y se obtiene cuando se ignoran las pérdidas por fricción debida a la viscosidad de los fluidos considerados.

PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Esta ley se enuncia asi:

El cambio de la energia interna de un sistema puede producirse, bién sea haciendo trabajo sobre el sistema o mediante el calor (una transferencia de energia debida exclusivamente a una diferencia de temperaturas entre el sistema y los alrededores) o equivalentemente, la variación de la energia interna de un sistema se transforma en trabajo y calor.

Simbólicamente, la primera ley de la Termodinámica se escribe como:

$$\Delta E_{is} = W_{as} + Q$$

El trabajo W_{as} (de los alrededores sobre el sistema) puede ser de cualquier tipo: eléctrico, muscular (mecánico), químico, hidrostático, etc. Q es el calor involucrado. En las reacciones bioquimicas que transcurren a temperatura y presión constantes el trabajo químico es equivalente al cambio de la energia libre de Gibbs (ΔG).

Otra forma de expresar la primera ley es la utilizada en los estudios de metabolismo corporal:

$$\Delta E_{is} = W_{ext} + Q + E_{qa}$$

donde E_{qa} es la energia química almacenada en diversas moléculas.

4. La energía necesita de un portador

La energia necesita siempre un portador, onda o particula que la transporte.

5. Transmisión y propagación. Acumulación.

La energia se puede propagar a través del mismo cuerpo y se puede transmitir hacia otro, además se puede acumular (al contrario del calor y el trabajo, que no pueden acumularse), por ejemplo, en los enlaces químicos de la molécula de ATP.

i) La potencia metabólica

La energia metabólica es la energia requerida por el organismo para ser empleada en el cumplimiento de sus diversas actividades. Esta energia está almacenada en enlaces altamente energéticos como los de la molécula de ATP. La potencia metabólica se refiere a la variación de la energia metabólica entre la unidad de tiempo.

La unidad de potencia metabólica es la unidad de energia entre la unidad de tiempo: Joule/ s = Vatio o bien Ergio/s.

Si suponemos que la energía metabólica diaria requerida por un sujeto en condiciones basales es aproximadamente 1.500 Kcal, su potencia metabólica basal (PMB) o tasa metabólica basal (TMB) es :

$$TMB = 1500 \text{ Kcal} / 24 \text{ h} = 62,5 \text{ Kcal} / \text{h} = 72,6 \text{ Vatios}$$

Si suponemos que el área corporal del sujeto es 1,60 m^2 entonces su TMB/ área será: 39 Kcal / (h. m^2). Existe una unidad de TMB / área que es el MET:

$$1 \text{ MET} = 50 \text{ Kcal} / (\text{h}. m^2).$$

Si el peso del sujeto es 62,5 Kg., entonces su TMB / masa = 1 Kcal / (h.Kg).

j) El trabajo

Es el producto de la fuerza aplicada a un cuerpo por el desplazamiento del mismo: W = F • d. Las unidades son Kg-f • m que se denomina Kilográmetro; N • m = Joule y dina • cm = Ergio. Se utiliza frecuentemente el término trabajo generalizado para denotar a una multiplicación de una fuerza generalizada por un desplazamiento generalizado cuyo producto tenga unidades de energía. En Fisiología aparecen diversos tipos de trabajo generalizado. En la tabla III aparecen algunos de ellos.

TABLA III

DIVERSOS TIPOS DE TRABAJO PRESENTES EN LOS FENÓMENOS FISIOLÓGICOS

Trabajo	*Fuerza generalizada*	*Desplazamiento generalizado*
Mecánico	Fuerza	Desplazamiento
Expansión (hidrostático)	Presión	Cambio de Volumen
Eléctrico	Voltaje	Carga
Químico	Potencial químico	Concentración
De tensión	Tensión elástica o superficial	Superficie

k) Potencia mecánica

Es la variación de trabajo por unidad de tiempo que realiza un cuerpo, por ejemplo, un músculo cuando se acorta. Las unidades son las mismas que corresponden a la potencia metabólica. Otras unidades de potencia mecánica son el caballo de vapor (CV) y el caballo de fuerza (Horse Power):

$$1 \text{ HP} = 746 \text{ Vatios}$$

$$1 \text{ CV} = 735,5 \text{ Vatios}$$

l) El calor

Está involucrado en procesos o mecanismos para transferir energía térmica de un sistema a otro, que involucra una diferencia de temperatura. El calor tiene las mismas unidades que la energía. La transferencia de energía puede ocurrir mediante conducción (los cuerpos están en contacto), mediante convección (un fluido transporta energía térmica) o bien mediante radiación (la emisión o absorción de energía electromagnética). Estos tres mecanismos ocurren en diversos eventos fisiológicos.

En la tabla IV se presentan las características de la energía, el trabajo y el calor a la luz de las teorías físicas vigentes.

TABLA IV

CARACTERÍSTICAS DE LOS CONCEPTOS DE ENERGÍA, TRABAJO Y CALOR A LA LUZ DE PARADIGMAS VIGENTES

ENERGÍA:	Es una magnitud física que se presenta en diversas formas. / Involucrada en los procesos de cambio de estado (mecánico o no). Es una función de Estado. / Se transforma. / Se transmite. / Depende del sistema de referencia. / Se conserva (en un sistema de referencia fijo). / Está asociada a un "sujeto" (onda o partícula –masiva o no–) para su transmisión o intercambio.
TRABAJO:	Involucrado en procesos para transformar, transmitir o intercambiar la energía. / No es una función de Estado. / No es una forma de energía. / No se conserva. / Su magnitud se expresa en las mismas unidades que la energía. / Involucrados en fenómenos mecánicos o no. / No lo poseen los cuerpos.
CALOR:	Involucrado en procesos para transferir la energía. / Se presenta sólo cuando existe una diferencia de temperatura entre sistemas multiparticulados interactuantes / No es una función de Estado. / No es una forma de energía. / No se conserva. / Su magnitud se expresa en las mismas unidades que la energía. Involucrados en fenómenos mecánicos o no. / No lo poseen los cuerpos.

a) Longitud

1 metro = 100 centímetros = 39,37 pulgadas = 3,28 pies = 1,09 yardas.

1 centímetro = 10 milímetros = 0,39 pulgadas.

1 pulgada = 2,54 centímetros = 254 milímetros.

1 kilómetro = 1.000 metros = 0,62 de milla (USA) = 3280,80 pies.

1 milla (U.S.A) = 5280 pies = 1,61 kilómetros.

b) Masa

1 kilogramo = 1.000 gramos = 2,20 libras (avoirdupois) = 2,68 libras (farmacéuticas[b]).

1 gramo = 1.000 miligramos = 0,03 de onza (avoirdupois) = 0,03 de onza (farmacéutica).

1 libra (avoirdupois) = 16 onzas (avoirdupois) = 0,45 kilogramo = 454,60 gramos.

1 libra (farmacéutica) =12 onzas (farmacéuticas)=0,37 de kilogramo=373,24 gramos.

1 onza (avoirdupois) = 28,35 gramos.

1 onza (farmacéutica) = 31,10 gramos.

1 gramo = 65,80 miligramos.

c) Volumen

1 litro = 1.000 mililitros = 1,06 cuarto (USA) = 0,88 cuarto (británico o imperial).

1 mililitro = 0,03 de onza (USA) = 0,03 de onza (británica) =1,00 centímetro cúbico.

1 onza (USA) = 29,57 mililitros.

1 onza (británica) = 28,41 mililitros.

1 cuarto (USA) = 0,25 de galón (USA) = 0,95 litro = 946,36 mililitros.

1 cuarto (británico) = 0,25 de galón (británico) = 1,14 litros = 1136,52 mililitros.

a) Todos los valores de este cuadro se han redondeado a dos espacios decimales.
b) El peso formacéutico es el mismo que el peso troy.

Fig. 14: Factores de conversión entre diversas unidades estándar. Ref. [11]

m) La presión hidrostática

Es una magnitud muy utilizada en fisiología respiratoria y cardiovascular. El aire en las vías aéreas, la sangre en los vasos sanguíneos, y en general los diversos fluidos corporales ejercen una presión sobre las paredes de la cavidad que los contiene. Esa presión es igual al cociente de la fuerza aplicada perpendicularmente a una superficie, entre el área de ella:

$$p = F_{perp} / A$$

Sus unidades son entre otras: N/m^2 = 1 Pascal; D/cm^2, Libra-f /$pulg^2$, y mm de Hg.

La diferencia de presión hidrostática Δp en los extremos de un conducto cilíndrico, horizontal y de sección transversal constante, está relacionada con el flujo F (volumen / tiempo) de un fluido que circula por dicho conducto, por la expresión: $\Delta p = F \cdot R_r$

donde R_r es la resistencia del conducto al flujo.

TABLA V

DIVERSAS MAGNITUDES DERIVADAS Y SUS UNIDADES. Ref. [11]

Notación	*Magnitud*	*Unidades*
v	Velocidad	L/t ; m/s, cm/s, Km/h, millas/h
a	Aceleración	V/t ; m/s^2, cm/s^2
F	Fuerza	M • a ; $kg.m/s^2$, g • cm/s^2
T	Tensión	F/L ; N/m ; D/cm
E	Energía	Ec , Ep ; joule, ergio, caloría
P_{met}	Potencia metabólica	Em/t ; Joule/s = 1 vatio ; Ergio/s
W	Trabajo	F.L; Kg-f • m; N • m = Joule; D • cm = ergio
P_{mec}	Potencia mecánica	W/t; Joule/s, Ergio/s
Q	Calor	Joule, ergio, caloría
Ph	Presión hidrostática	F/S ; N/m^2 = Pascal , D/cm^2, Libra-f /$pulg^2$

Para convertir	*En*	*Multiplicar por*
Atmósferas	Milímetros de Hg	760
Atmósferas	Dinas/cm^2	1,01 x 10^6
Calorías	Joules	4,186
KCalorías	Joules	4.186
KCalorías	Calorías	1000
Dinas/cm	Ergs/cm^2	1,0
Dinas/cm^2	cm H_2O,4°C	0,001
Dinas/cm^2	gm/cm^2	0,001
Dinas/cm^2	Kg/m^2	0,01
Dinas/cm^2	mm de Hg a 0°C	7,50 x 10^{-4}
Ergs	Kilográmetros	1,02 x 10^{-8}
Ergs	Joules (absolutos)	1 x 10^{-7}
Aceleración de Gravedad	cm/seg^2	980,67 (o 981)
Joules	Ergs	1 x 10^7
Joules (absoluto)	Kilográmetros	0,102
Kilográmetros	Joules (absolutos)	9,81
Kilográmetros/segundo	Vatios (absolutos)	9,81
Kilográmetros	Ergs	9,81 x 10^7
Milímetros de Hg a 0°C	Atmósferas	0,0013
Milímetros de Hg a 0°C	libras/pies^2	2,785
Milímetros de Hg a 0°C	libras/pulgadas^2	0,0193

Fig. 15: Factores de conversión entre algunas unidades físicas. Ref. [11]

Prefijo	*Abreviación del prefijo*	*Factor por el cual se multiplica la unidad*
Tera-	T	10^{12}
Giga-	G	10^9
Mega	M	10^6
Kilo-	K	10^3
Hecto-	H	10^2
Deca-	D	10
deci-	d	10^{-1}
centi-	c	10^{-2}
mili-	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano-	n	10^{-9}
pico-	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
atto-	a	10^{-18}

Fig. 16: Prefijos de múltiplos y submúltiplos de unidades básicas. Ref. [11]. Siguiendo acuerdos internacionales, los múltiplos de las unidades, (kilómetro: Km. hectolitro: Hl, etc.) se indicarán abreviados con mayúscula, y los submúltiplos (centímetro: cm; miligramo: mg, etc.) se indicarán abreviados con minúsculas para evitar confusiones.

En las figuras 14 y 15 aparecen los factores de conversión entre algunas unidades estándar y físicas respectivamente. En la figs. 15 y 16 se presentan los múltiplos y submúltiplos de las diversas unidades.

X. MAGNITUDES QUÍMICAS. UNIDADES

Se define un mol de partículas como el número de Avogadro de partículas: 1 mol de partículas es igual a :

$$N_A = 6{,}023 \times 10^{23} \text{ partículas}$$

Estas partículas pueden ser átomos o moléculas o cualquier otra entidad química.

El peso atómico-g (en Química cuando nos referimos al peso, realmente estamos considerando la masa) de un elemento se define como el peso en gramos del número de Avogadro (N_A) del elemento químico en cuestión:
Peso atómico –g = N_A x peso de un átomo del elemento E

El peso de un átomo es un peso promedio, a consecuencia de la existencia de los isótopos (átomos con igual número atómico pero diferente número de masa). Por lo tanto el peso del átomo del elemento E, en el caso que tenga dos isótopos naturales estables va a ser igual a:

$$\textbf{Peso de un átomo de E} = A_1 \cdot P_1 + A_2 \cdot P_2 \quad (*)$$

donde P_1 y P_2 son las masas atómicas de los isótopos naturales estables expresadas en uma y A_1 y A_2 son las abundancias respectivas. **Para el elemento carbono tendremos dos isótopos naturales estables, el C^{12}_6 con una abundancia del 98,89 % y una masa atómica en gramos de 12,000000 y el C^{13}_6 con una abundancia de 1,11% y una masa atómica en gramos de 13,00335. El carbono posee otro isótopo natural pero es inestable, el C^{14}_6 y no se considera para el cálculo del peso atómico-**

gramo. El valor de éste para el carbono, será entonces:

$$PA\ (gramos) = 12{,}000000\ (98{,}89/100) + 13{,}00335\ (1{,}11/100)$$

$$= 11{,}8668 + 0{,}144337 = 12{,}01114$$

En el caso del elemento hidrógeno, el hidrógeno normal (isótopo 1) se representa como H^1_1, donde el número de protones en el núcleo es 1 (Z = 1) y su número de masa (número de protones (Z) más el número de neutrones (N) que también es 1), porque el hidrógeno normal no tiene neutrón. El deuterio es el segundo isótopo del hidrógeno y se describe como H^2_1, el cual tiene un protón (Z = 1), pero además tiene un neutrón (N = 1). Existe otro isótopo del hidrógeno, el tritio H_1^3, pero es inestable (radioactivo). Para calcular el peso atómico del hidrógeno debe utilizarse la abundancia natural de cada uno de los isótopos naturales estables del elemento.

Los pesos atómicos que aparecen en la tabla periódica son los pesos atómicos de cada elemento calculados de acuerdo con la expresión (*).

Existe una unidad de masa denominada Dalton que es igual a una unidad de masa atómica (1 uma). La unidad de masa atómica se define como la doceava parte de la masa del átomo de carbono C^{12}_6 que es el isótopo más abundante del elemento carbono. Este isótopo posee 12 nucleones (el número de protones es 6 y el de neutrones también, asi su suma es 12).

$$1\ Dalton = 1\ uma = (1/12)\ m\ (C^{12})$$

Si se usa esa relación, para el cálculo de la masa del átomo de carbono-12 resulta lo siguiente:

$$m\ (C^{12}) = 12\ uma = 12\ Daltons$$

Las macromoléculas tienen masas moleculares mucho mayores, por ejemplo: mioglobina, 17.600 Daltons y hemoglobina, 68.000 Daltons. O, equivalentemente, poseen un peso molecular gramo (peso fórmula gramo) de 17.600 g y 68.000 g, respectivamente.

El peso atómico-g de un elemento quimico es el número que indica su peso atómico en uma (puma) pero expresado en gramos. Esta afirmación se deduce del hecho que:

Peso atómico-g = N_A • peso de un átomo expresado en gramos y el peso de un átomo expresado en gramos se puede determinar como:

$$puma \bullet 1\ uma$$

asi:

$$\text{Peso atómico-g} = N_A \bullet\ puma \bullet 1uma = puma \bullet 1\ g = puma\ g$$

Donde hemos utilizado:

$$NA \bullet 1uma = 1g$$

Es importante resaltar que el peso atómico-g de un elemento quimico no es el número de masa (número de protones + número de neutrones) de alguno de sus isótopos expresado en gramos ni tampoco la masa de un determinado isótopo de un elemento quimico es exactamente igual a su número de masa expresado en uma, aunque en este último caso la diferencia es relativamente pequeña.

Otro concepto que interesa en Fisiologia es el peso equivalente y se define como el peso atómico del elemento expresado en daltons (uma) dividido entre un número entero positivo. Asi:

$$\text{Peso equivalente} = PA\ (\text{uma o Daltons}) / z$$

Muchas veces se utiliza el peso equivalente gramo (denominado también equivalente-gramo) que se define como el peso atómico gramo entre z.

$$\text{Peso equivalente-g} = \text{Peso atómico - g} / z$$

donde z es la magnitud de la valencia del átomo (magnitud de la carga del ión obtenido a partir del átomo).

El peso equivalente-g o equivalente-g es la masa de una sustancia que desplaza o reacciona con 1,008 gramos de hidrógeno o con 8 gramos de oxigeno.

La tabla VII presenta los pesos atómicos de diversos elementos quimicos (usando sólo dos cifras significativas), obsérvese que estos valores son aproximadamente iguales al número de masa (A) expresado en gramos o en

UMA del isótopo más abundante. La tabla VIII es la tabla periódica de los elementos químicos.

X. UNIDADES DE CONCENTRACIÓN

A finales del siglo XIX, el científico Claude Bernard introdujo el concepto de homeóstasis en Fisiología, para referirse a la constancia de las composición del medio interior (líquido extracelular). Como esta composición se refiere parcialmente a la concentración de diversas sustancias en el líquido extracelular, es obligante hacer un estudio exhaustivo de las unidades de concentración.

Electrolitos y no-electrolitos

Las sustancias que se utilizan para preparar una solución pueden clasificarse como electrolitos y no electrolitos. Los primeros son sustancias que en solución acuosa se disocian en iones y los segundos son sustancias que en solución acuosa no se disocian. Los electrolitos pueden presentar una disociación incompleta; este hecho permite clasificarlos en fuertes y débiles. Los primeros presentan disociación completa o casi completa aún a altas concentraciones. Los segundos presentan disociación completa solamente a muy bajas concentraciones (soluciones muy diluidas), por lo tanto, es conveniente introducir el coeficiente de disociación β, definido como:

$$\beta = \text{cantidad de soluto disociado / cantidad de soluto inicial}$$

que está comprendido entre 0 y 1. Cuando $\beta = 0$ tendremos un no electrolito y cuando $\beta = 1$ tendremos un electrolito con disociación completa.

De tal manera que si deseamos conocer la concentración de la cantidad de soluto disociada (denominada por algunos autores actividad), debemos utilizar la siguiente expresión:

$$A = \beta \cdot \text{concentración nominal}$$

donde la concentración nominal C_n se calcula utilizando la cantidad de soluto inicial. Es decir:

$$C_n = \text{cantidad de soluto inicial/volumen de la solución}$$

La concentración de la parte no disociada del electrolito C_{nd} se calcula como:

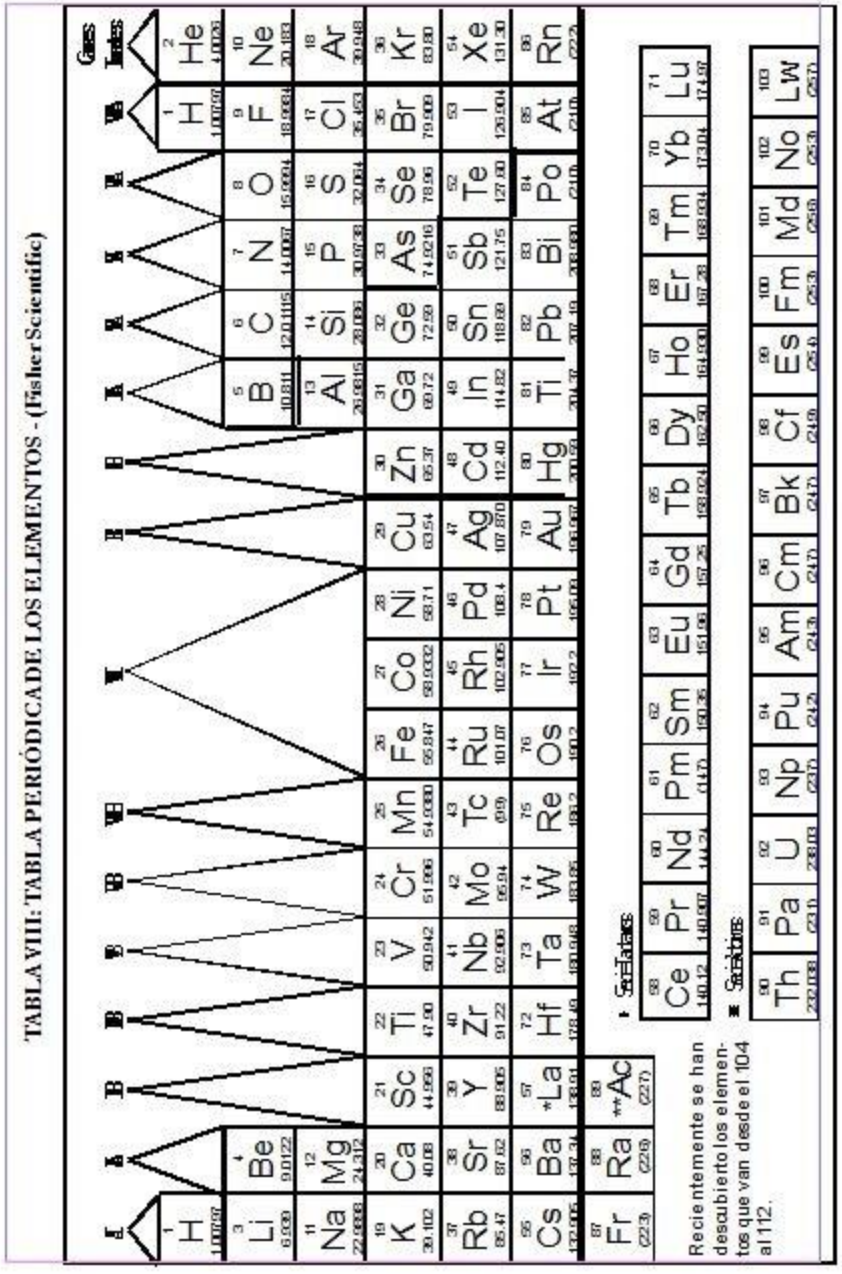


TABLA VII

ALGUNOS ELEMENTOS QUÍMICOS Y SUS PESOS ATÓMICOS

Elemento	*Símbolo*	*Peso atómico (gramos o uma)*
Hidrógeno	H	1,00
Carbono	C	12,01
Nitrógeno	N	14,01
Oxígeno	O	16,00
Sodio	Na	23,00
Magnesio	Mg	24,31
Fósforo	P	31,00
Azufre	S	32,1
Cloro	Cl	35,45
Potasio	K	39,10
Calcio	Ca	40,10
Manganeso	Mn	54,93
Hierro	Fe	55,85
Cobalto	Co	58,93
Cobre	Cu	63,54
Cinc	Zn	65,37
Iodo	I	126,90

$$C_{nd} = (1- \beta) \cdot C_n$$

Es importante mencionar que muchos autores reservan el término molaridad para expresar la concentración de la parte no disociada y el de formalidad para la concentración nominal. Sin embargo, este criterio no es universal.

En el caso de sustancias que no presentan disociación (no electrolitos) debemos observar que para sus soluciones la actividad es cero (puesto que $\beta = 0$) y sólo tiene sentido referirse a la concentración nominal. En soluciones sobresaturadas*, en donde parte del no-electrolito utilizado para preparar la solución no se disuelve, la concentración nominal es obviamente mayor que la concentración asociada a aquella parte de la sustancia que se disuelve, y, por supuesto, también mayor a la concentración asociada a la parte que no se disuelve.

La concentración es una magnitud derivada. Existen diversas formas de expresar la concentración C de una solución.

1. Forma (p/v)

Expresa la masa de un soluto (M) utilizada para preparar un cierto volumen de solución dividido entre el volumen de ésta o del solvente (V). La concentración determinada de esta manera es denominada concentración nominal. Obsérvese que esta forma de expresar la concentración tiene las mismas unidades de la densidad, pero no tiene el mismo significado.

C = masa del soluto / volumen de la solución

gramos de soluto / 100 ml de solución = g% = % (P/V)

También se puede expresar en mg de solutos entre 100 ml de solución:

miligramos de soluto / 100 ml de solución = mg %

Como 100 ml son equivalentes a un decilitro (1 dl), la notación mg% puede sustituirse por mg/ dl.

En vez de volumen de la solución, se puede utilizar el volumen del solvente. En ocasiones se suele expresar la concentración M/V en términos de 1000 ml de solución:

gramos de soluto / 1000 ml de solución = g por mil

miligramos de soluto / 1000 ml de solución = mg por mil

Obsérvese que la unidad mg / ml (que es igual a g / litro) se obtiene a partir de la unidad mg / 100ml de la siguiente forma:

mg / ml = (mg / 100 ml) / 100

2. Otras formas : %(p/p) y %v/v

La concentración expresada en % (P/P) tiene la forma:

* En soluciones no sobresaturadas de un electrolito, tanto los componentes de la disociación, como de la parte no disociada, están disueltos. Así, en soluciones no sobresaturadas de un electrolito, éste está completamente disuelto. Igual ocurre en el caso de un no-electrolito.

gramos de soluto / 100 g de solución = % (P/ P)

La concentración expresada en V/V tiene la forma:

ml de soluto / 100 ml de solución = % (V/ V)

y es muy utilizada para expresar las concentraciones de soluciones líquido-líquido.

3. Unidades de concentración químicas

Estas unidades son: Molaridad, Normalidad, Molalidad, Osmolaridad, Osmolalidad, Fracción Molar y ppm (partes por millón de partes). Esta última unidad es equivalente (en el caso de soluciones acuosas muy diluidas) a microgramos / mililitro (mg / ml).

a) Molaridad (M).

La molaridad requiere de la definición del número de moles. Este es igual a la masa en gramos de una determinada sustancia dividido entre su peso molecular-g o peso atómico-g (P).

n = número de moles = masa (gramos) / P(gramos)

La molaridad se define entonces como el número de moles de soluto entre el volumen de la solución expresado en litros. Al ejecutar el cociente obtendremos el número de moles en un litro de solución:

M = n / V (litros)

Una solución con una concentración 1 Molar (1 M) significa un mol de soluto en un litro de solución. En Fisiología, es ampliamente usada la milimolaridad (mMolar) que se define como el número de milimoles (un milimol es la milésima parte de un mol) dividido entre el volumen de la solución expresado en litros (número de milimoles por litro de solución). Para transformar una concentración dada en Molaridad (M) a miliMolaridad (mM) debemos utilizar la siguiente fórmula:

mM = milimoles / litro = 1000 • M

La molaridad de una solución puede obtenerse a partir de su concentración en mg / ml (o equivalentemente, g / litro) utilizando la siguiente fórmula:

M = [mg / ml] / Peso atómico o molecular

o bien:

M = [mg / 100 ml] / (100 x Peso atómico o molecular gramo).

La molaridad de un determinado ión referida a la sangre se calcula a partir de su molaridad en plasma mediante la expresión:

M (sangre del ión X) = M (plasma del ión) x [1 – (Hcto / 100)]

donde Hcto es el hematocrito

Ejemplo: Una solución acuosa de ácido oxálico ($H_2C_2O_4$) se prepara utilizando 1 mol del ácido en un litro de solución. El coeficiente β del ácido es 0,22. Calcular la actividad y la concentración correspondiente a la parte no disociada.

Como la concentración nominal es 1 M, las concentraciones que se piden son:

$A = 0{,}22$ M y $C_{nd} = 0{,}78$ M

b) Molalidad (m)

Se define como el número de moles de soluto dividido entre la masa del solvente expresada en kilogramos. Al efectuar el cociente, obtendremos el número de moles en un kilogramo de solvente.

m = n / masa del solvente (Kg)

Si el solvente empleado es el agua, entonces su masa expresada en kilogramos es numéricamente igual al volumen expresado en litros, ya que su densidad es igual a 1Kg/litro (1g/cm^3), o muy cercana a este valor, dependiendo de su temperatura. Así que la molalidad, en el caso del agua, es numéricamente igual al valor que se obtiene cuando se sustituye la masa del agua por su volumen:

m* = n / volumen del agua (litros) = m

Además, en el caso del agua utilizada como solvente, si el volumen del soluto es despreciable, el volumen de agua es aproximadamente el volumen de la solución, entonces, la molaridad (M) es aproximadamente igual a m* y a la molalidad (m). Esto es cierto para soluciones acuosas sencillas, como el NaCl al 0,9%, glucosa al 5% y soluciones Ringer. Sin embargo, para soluciones más complicadas, como el plasma, la situación es menos simple. De un volumen dado de plasma (volumen de la solución), el 10% está formado

por sólidos (incluyendo proteinas, lipidos, urea y glucosa, etc.) y el 90% restante es agua. Asi 1 litro de agua estará contenido en 1,11 litros de plasma y por esto la molalidad y la osmolalidad serán algo mayor que la molaridad y la osmolaridad. Es ampliamente utilizada en Fisiologia, la milimolalidad (mmolal) que es el número de milimoles por kilogramo de solvente. Para transformar una concentración dada en molalidad (m) a milimolalidad (mmolal) debemos utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{mmolal} = \text{milimoles} / \text{Kg} = 1000 \cdot m$$

c) Normalidad (N)

Se expresa la normalidad como el número de equivalentes (n*) entre el volumen de la solución en litros :

$$N = n^* / \text{volumen solución (litros)}$$

donde n* se obtiene dividiendo la masa de soluto en gramos entre su peso equivalente – g. Asi que:

$$N = \text{masa} / (\text{peso equivalente-g} \cdot \text{volumen})$$

y como el peso equivalente-g = P / z , obtenemos para N:

$$N\ (\text{masa} \cdot z) / (P \cdot \text{volumen}) = (n \cdot z) / \text{volumen}$$

Asi que:

$$N = z \cdot M$$

Obsérvese que este resultado se debe a que:

$$n^* = z \cdot n$$

es decir:

$$\text{No. de Eq} - g = z \cdot \text{número de moles}$$

Se puede pasar a meq/litro multiplicando la normalidad por 1000:

$$\text{mEq/ litro} = 1000 \cdot N$$

Otra equivalencia es:

$$\text{mEq / litro} = (\text{mg por litro}) \cdot z / \text{peso atómico o molecular} - g$$

o bien:

$$\text{mg/ litro} = (\text{mEq / litro}) \cdot \text{peso atómico} / z$$

Anteriormente, se mencionó que z era la magnitud de la valencia asociada al átomo; pero en este momento ampliaremos el significado de z, ya que en la práctica cotidiana nos referimos a la normalidad de una solución preparada con un ácido, una base, una sal o de un ión. En estos casos z se referirá al número de átomos de hidrógeno (ácido), de oxidrilos (base), la magnitud de la carga neta positiva o negativa (sal) o la carga (ión), respectivamente.

La tabla IX presenta las concentraciones de diversas sustancias presentes en el plasma utilizando diversas unidades y la tabla X presenta las caracteristicas estequiométricas de algunas sustancias electroliticas usadas en Medicina.

TABLA IX
CONCENTRACIÓN DE DIVERSAS SUSTANCIAS EN PLASMA Ref. [16]

Concentración en plasma	*Unidad típica*	*Unidad (Sistema Internacional)*
CALCIO	10 mg / dl	2,5 mmol/ l
MAGNESIO	1,0 mEq / l	0,5 mmol / l
SODIO	140 mEq / l	140 mmol / l
POTASIO	4,25 mEq /l	4,25 mmol /l
CLORURO	100 mEq/ l	100 mmol/ l
BILIRRUBINA	1 mg / dl	18 micromoles / l
NITROGENO UREICO	10 mg / dl	3,6 mmoles / l
CREATININA	1 mg / dl	88 micromol / l
GLUCOSA	100 mg / dl	5,5 mmoles / l

d) El concepto de osmol

Para el caso de un electrolito que se disocia completamente, un Osmol (Osm) es igual al peso molecular-gramo del electrolito dividido entre el número de particulas liberadas por cada molécula del electrolito al disociarse. Asi que:

$$1\ \text{Osm} = \text{PMG} / i = 1\ \text{mol} / i$$

donde i es el factor de disociación [número de moléculas (o moles) que se producen cuando se disocia una molécula (o un mol) del electrolito] y PMG es el peso molecular gramo. Obsérvese que la fórmula anterior tiene la misma

estructura matemática que la existente entre el peso equivalente-g y el factor z.

Ejemplo: 1 Osmol de NaCl (cuando se disocia completamente) será igual a 0,5 moles de NaCl.

Para un electrolito que no se disocia completamente sino con un grado de disociación β (número de moles disociados / número de moles totales), un Osmol es igual al peso molecular-gramo del electrolito dividido entre el número de moles de partículas liberadas por cada mol del electrolito al disolverse.

$$1 \text{ Osmol} = 1 \text{ mol} / [i\beta + (1-\beta)]$$

Ejemplo: 1 Osmol de NaCl, cuando se disocia con $\beta = 0,9$ (por cada mol de NaCl se disocian 0,9 moles, o equivalentemente por cada 10 moles se disocian sólo 9 moles) tendrá un valor de 0,526 moles de NaCl, ya que el factor $[i\beta + (1-\beta)]$ tiene un valor de 1,9.

Para un no electrolito (sustancia que no se disocia), como la glucosa, 1 Osmol de esa sustancia será igual a un mol de la misma.

e) Número de osmoles

Caso 1: Electrolito que se disocia completamente ($\beta = 1$)

El número de osmoles es el producto del número de moles del electrolito por el coeficiente de disociación. Esto se puede demostrar partiendo de la fórmula utilizada para calcular 1 Osmol. Así, obtenemos:

$$\eta \text{ (osmoles)} = \text{masa} / 1 \text{ osmol} = \text{masa} / (\text{PMG} / i)$$

o también :

$$\eta \text{ (osmoles)} = n \text{ (moles)} / 1 \text{ osmol} = n \text{ (moles)} / (1\text{mol} / i)$$

Así que, cualquiera sea el procedimiento que se utilice, se obtiene, para un electrolito que se disocia completamente:

$$\eta \text{ (osmoles)} = i \bullet n$$

donde n es el número de moles del electrolito (obsérvese que la relación anterior tiene la misma estructura matemática que la existente entre el número de equivalentes y el número de moles, basta sustituir i por z).

El número de osmoles de un electrolito es el número de moles totales de partículas disociadas, generadas por él, que existen en la solución. De aquí proviene la siguiente definición de 1 Osmol del electrolito: es aquel número de moles del electrolito que produce un mol total de partículas disociadas.

Suponiendo que el NaCl se disocia completamente, entonces 1 mol del electrolito generará 2 moles de partículas independientes (en este caso los iones sodio y cloro). Así, para generar un único mol de partículas independientes serán necesarios 0,5 mol de NaCl y este es el valor de un Osmol de NaCl, suponiendo disociación completa.

Caso 2: Electrolito que no se disocia completamente. Supongamos que tenemos n moles de NaCl que no se disocian completamente sino con un grado de disociación (conocido también como coeficiente osmótico) β, el número de osmoles de NaCl se calcula, en este caso, utilizando la siguiente expresión:

$$\eta \text{ (Osmoles)} = [i\,\beta + (1-\beta)] \bullet n \text{ (moles)}$$

Ejemplo: Supongamos que preparamos una solución utilizando 10 moles de NaCl que no se disocian completamente sino con $\beta = 0,9$. Esto significa que por cada 10 moles se disocian 9, y como el factor de disociación del NaCl es 2, tendremos en la solución 9 moles de Na^+ y 9 moles de Cl^-, es decir, 18 moles debido sólo a los iones, pero existe además en la solución 1 mol de NaCl, no disociado. Así el número de moles totales de partículas independientes (osmóticamente activas) es 19. Es decir, habrá 19 Osmoles de NaCl en la solución. Este es el valor que se obtiene al aplicar la fórmula.

El resultado anterior permite enunciar los conceptos de número de osmoles y de un osmol, válidos tanto para un electrolito con disociación completa o parcial:

> El número de osmoles de un electrolito es el número de moles totales de partículas independientes, generadas por él (considerando la parte del electrolito, disociada como la no disociada), que existen en la solución. De aquí se deriva la siguiente definición general de 1 Osmol del electrolito: es aquel número de moles del electrolito que produce un mol de partículas independientes.

En el ejemplo anterior, 10 moles son necesarios para producir 19 Osmoles (moles totales de partículas independientes), así que 1 Osmol será igual al

cociente (10 / 19) que es igual a 0,526 moles de NaCl, valor que ya habíamos obtenido anteriormente.

Caso 3: Solución preparada a partir de n moles de un electrolito y de n' moles de un no electrolito.

En este caso el número de osmoles en la solución será:

$$\eta = [i\,\beta + (1-\beta)]\,n + n'$$

Es decir, el número de osmoles generados por la disociación del electrolito más el número de osmoles producidos por el no electrolito (que es igual a su número de moles). En el caso particular de disociación completa del electrolito, $\beta = 1$, obtendremos:

$$\eta = (i.n) + n'$$

Si tenemos una solución formada por diversos iones (generadas a partir de distintos electrolitos) y no electrolitos, de la cual conocemos el número de osmoles que contiene (que es igual al número de moles de partículas independientes) pero no sabemos la forma de preparación, no podemos inferir el número de moles de cada electrolito y no electrolito usados en la preparación de una solución de tal naturaleza. Este es el caso del plasma humano.

f) Osmolaridad

La osmolaridad es la concentración total de partículas independientes (osmóticamente activas) que existen en un volumen de solución expresado en litros. Esta concentración se expresa en términos del número de moles totales correspondientes a estas partículas en un litro de solución. En términos cuantitativos:

$$\text{Osmolaridad} = n_{\text{totales de p.i}} \,/\, \text{volumen de la solución (litros)}$$

donde:

$$n_{\text{totales de p.i}} = n_{\text{iones}} + n_{\text{end}} + n_{\text{ne}}$$

donde n_{iones} es el número de moles de los iones presentes en la solución, n_{end} es el número de moles correspondientes a los electrolitos no disociados y n_{ne} es el número de moles de las sustancias que no son electrolitos. Evidentemente, para el caso de una solución preparada a partir de n moles de un electrolito y

TABLA X

CARACTERÍSTICAS DE ALGUNAS SUSTANCIAS ELECTROLÍTICAS USADAS EN LA PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE USO EN MEDICINA Ref. [16].

	Fórmula	*Catión*	*Anión*	*N° de Partículas*	*Peso* Molecular*
SODIO					
Cloruro	NaCl	Na^+	Cl^-	2	58,5
Bicarbonato	$NaHCO_3$	Na^+	HCO_3^-	2	84
Acetato	$Na(C_2H_3O_2)$	Na^+	$C_2H_3O_2^-$	2	82
Lactato	$Na(C_3H_5O_3)$	Na^+	$C_3H_5O_3^-$	2	112
Sulfato	Na_2SO_4	$2Na^+$	$SO_4^=$	3	142
Fosfato (dibásico)	Na_2HPO_4	$2Na^+$	$HPO_4^=$	3	142
Fosfato (monobásico)	NaH_2PO_4	Na^+	$H_2PO_4^-$	2	120
Gluconato	$Na(C_6H_{11}O_7)$	Na^+	$C_6H_{11}O_7^-$	2	218
POTASIO					
Cloruro	KCl	K^+	Cl^-	2	74,5
Fosfato (dibásico)	K_2HPO_4	$2K^+$	$HPO_4^=$	3	174
Fosfato (monobásico)	KH_2PO_4	K^+	$H_2PO_4^-$	2	136
CALCIO					
Cloruro (anhidro)	$CaCl_2$	Ca^{2+}	$2Cl^-$	3	111
Cloruro	$CaCl_2 + 6H_2O$	Ca^{2+}	$2Cl^-$	3	219
Gluconato	$Ca(C_6H_{11}O_7)_2$	Ca^{2+}	$2C_6H_{11}O^-_7$	3	430
MAGNESIO					
Cloruro	$MgCl_2$	Mg^{2+}	$2Cl^-$	3	95

*Valores aproximados.

n' moles de un no electrolito, la expresión anterior es igual a:

$$n_{\text{totales de p.i}} = [\, i\,\beta + (1-\beta)]\, n + n'$$

donde $i\,\beta\, n = n_{iones}$; $(1-\beta)\, n = n_{end}$ y $n' = n_{ne}$

La Osmolaridad se puede definir entonces como la molaridad total de una solución:

$$\text{Osmolaridad} = M_{iones} + M_{end} + M_{ne} = \text{Molaridad total}$$

En aquellos casos en donde se conoce el factor (i) y el grado de disociación (β) del electrolito y su concentración molar (M), la Osmolaridad puede calcularse, para el caso de una solución formada exclusivamente a partir de ese electrolito como:

$$\text{OSMOLARIDAD} = i\,\beta M + (1-\beta)\, M$$

donde el primer término corresponde a la molaridad neta de los iones producidos a partir del electrolito (osmolaridad de los iones) y el segundo término corresponde a la molaridad de aquella parte del electrolito que no experimentó disociación.

En el caso de un electrolito que presenta disociación completa ($\beta = 1$), tenemos que:

$$\text{OSMOLARIDAD} = iM$$

En el caso de una solución preparada con un único electrolito, la osmolaridad puede escribirse también como:

$$\text{OSMOLARIDAD} = \eta \,/\, \text{volumen solución (litros)}$$

donde η es el número de osmoles del electrolito. Si hay dos electrolitos y un no electrolito:

$$\text{OSMOLARIDAD} = (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3) \,/\, \text{volumen de la solución (litros)}$$

donde η_1 y η_2 es el número de osmoles del electrolito 1 y 2, respectivamente y η_3 es el número de osmoles del no electrolito.

Ejemplo: Se tiene una solución 3 Osmolar de $CaCl_2$ en agua. ¿Cuál es la Molaridad, la Normalidad y la Molalidad de la solución suponiendo que el electrolito está completamente disociado? La densidad de la solución es 1,5 g / cc.

Solución:

$$\text{MOLARIDAD} = n\,(\text{moles}) \,/\, V = (\eta\,(\text{osmoles}) \,/\, i\,) \,/\, V$$

$$= (3/3) \,/\, (1\ \text{litro}) = 1\ \text{M}$$

$$\text{NORMALIDAD} = z \cdot M = 2 \cdot 1 = 2\ \text{N}$$

Para encontrar la molalidad debemos calcular previamente la masa de agua en un litro de solución y para ello debemos saber la densidad de ésta:

$$\text{masa de agua} = \text{masa de solución} - \text{masa del soluto}$$

$$\text{masa de la solución} = D \cdot V$$

$$\text{masa del soluto} = \text{número de moles} \cdot \text{Peso molecular gramo}$$

El lector debe terminar los cálculos, pero adelantaremos que el resultado es m = 0,72. Obsérvese que es menor que la molaridad. Este resultado es diferente al que se obtendría si la solución acuosa fuera muy diluida o fuera plasma humano.

Ejemplo: Se prepara una solución uniendo dos soluciones: 2 litros de NaCl con una concentración de 200 mM con otra de 4 litros de $CaCl_2$ con una concentración de 150 mM.

a) ¿Cuál es la normalidad de cada una de las soluciones?

b) ¿Cuál es la osmolaridad de la solución resultante?

a) El número de milimoles de la solución 1 (NaCl) es:

$$n_1 = 200\ \text{mM} \cdot 2\ \text{litros} = 400\ \text{milimoles}$$

y su número de equivalentes-gramo es:

$$n_1{}^* = n_1 \cdot z_1 = 400\ \text{milimoles} \cdot 1 = 400\ \text{mEq}$$

y la normalidad N_1 será:

$$N_1 = 400\ \text{mEq} \,/\, 2\ \text{litros} = 200\ \text{mN}$$

Para la solución 2 ($CaCl_2$) tendremos:

$$n_2 = 150\ \text{mM} \cdot 4\ \text{litros} = 600\ \text{milimoles}$$

y su número de equivalentes-gramo es:

$$n_2^* = n_2 \cdot z_2 = 600 \text{ milimoles} \cdot 2 = 1200 \text{ mEq}$$

y la normalidad N_2 será:

$$N_2 = 1200 \text{ mEq} / 4 \text{ litros} = 300 \text{ mN}$$

b) La osmolaridad de la solución resultante será:

$$\text{Osmolaridad} = (\eta_1 + \eta_2) / V \text{ solución (litros)}$$

donde η_1 es el número de osmoles del NaCl y η_2 es el número de osmoles de $CaCl_2$. Los valores de η_1 y η_2 serán:

$$\eta_1 = 0{,}4 \text{ moles} \cdot 2 = 0{,}8 \text{ osmoles}$$

$$\eta_2 = 0{,}6 \text{ moles} \cdot 3 = 1{,}8 \text{ osmoles}$$

Así la osmolaridad será:

$$\text{Osmolaridad} = 2{,}6 \text{ osmoles} / 6 \text{ litros} =$$

$$0{,}433 \text{ Osmolar} = 433 \text{ miliosmolar}$$

La osmolaridad considera la concentración total de particulas sin tomar en cuenta su naturaleza. El término osmolaridad es equivalente al de osmoticidad. Dos soluciones son isosmolares o isosmóticas cuando tienen la misma osmolaridad, es decir la misma molaridad total.

g) Osmolalidad

La osmolalidad es el número de osmoles que existen en un kilogramo del solvente de una solución. Todas las expresiones matemáticas encontradas anteriormente para la osmolaridad son válidas para la osmolalidad.

Para una solución preparada a partir de un único electrolito que se disocia completamente, la osmolalidad será el producto de la molalidad del electrolito multiplicada por el coeficiente de disociación:

$$\text{OSMOLALIDAD} = i \cdot m$$

La Osmolalidad del plasma humano es aproximadamente 290 miliOsmolal.

Nota: Como en un litro de plasma existen 0,9 litros de agua, la osmolaridad del plasma se obtiene multiplicando su osmolalidad por el factor 0,9 (o dividiendo por 1,11). La misma relación es válida para obtener la molaridad de un determinado componente del plasma a partir de la molalidad del mismo.

Ejemplo: Si la osmolalidad del plasma es 290 miliosmoles/Kg de agua, encontrar: a) la osmolaridad del plasma y b) la osmolaridad de la sangre con un hematocrito del 45%.

$$\text{Osmolaridad}_{\text{plasma}} = 0{,}9 \cdot 290 \text{ miliosmoles / litro de agua} = 261 \text{ miliosmoles / litro de plasma}$$

$$\text{Osmolaridad}_{\text{sangre}} = \text{Osmolaridad}_{\text{plasma}} \cdot (1 - \text{Hcto} / 100) = 261 \cdot 0{,}55 \text{ miliosmoles / litro de sangre.}$$

La determinación experimental de la osmolalidad del plasma se efectúa mediante un osmómetro que mide el punto de congelación del plasma (Tc_{plasma}). Definiendo el descenso crioscópico como:

$$\Delta T = Tc_{agua} - Tc_{plasma}$$

donde T_{cagua} es la temperatura de congelación del agua. El valor de ΔT es 0,54° C ($Tc_{agua} = 0$ °C y $Tc_{plasma} = -0{,}54$ °C). La relación entre el descenso crioscópico y la Osmolalidad es:

$$\text{Osmolalidad} = \Delta T / K_c$$

donde K_c es la constante crioscópica cuyo valor es 1,86 (°C / (mol/ kg de agua). El valor que se obtiene al realizar la operación es 0,290 Osmolal que es igual a 290 mOsmolal. Para calcular la osmolalidad del plasma a partir de la concentración de sus componentes, utilizamos la expresión:

$$\text{Osmolalidad} = 2([Na^+] + [K^+]) + 0{,}055\,[\text{Glucosa}] + 0{,}36\,[\text{BUN}]$$

donde la osmolalidad se expresa como milimoles / Kg de agua, la $[Na^+]$ y la $[K^+]$ en meq / litro de plasma (el factor 2 tiene incluido la conversión del volumen plasmático a volumen de agua (1,11) y la concentración de los iones que acompañan al sodio, principalmente Cl^- y HCO_3^-), la concentración de glucosa y de nitrógeno uréico sanguineo (BUN) debe expresarse, para que la fórmula tenga validez en mg% (los factores 0,055 y 0,36 convierten esta unidad de concentración a milimoles / litro de agua; si las concentraciones de glucosa y BUN se dan en esta unidad, estos factores son innecesarios).

XI. ÓSMOSIS

Supongamos un sistema que tiene dos compartimientos (ver fig. 17). En el compartimiento A existe una solución de un soluto con una concentración mayor a la que existe en el compartimiento B. La membrana que separa ambos compartimientos es semipermeable y sólo permite el paso de agua y no de soluto. Se observa que el agua fluye desde el compartimiento con la menor concentración de soluto (mayor cantidad de agua por particula de soluto) hacia el de mayor concentración de soluto (menor cantidad de agua por particula de soluto). Se puede detener el flujo de agua (flujo osmótico) aplicando una presión hidrostática al compartimiento A. Esa presión es numéricamente igual a la diferencia entre la presión que llamaremos osmótica, entre ambos compartimientos:

$$p_h = p_{osmA} - p_{osmB}$$

Si la presión hidrostática aumenta por encima de este valor se produce la denominada ósmosis inversa: el agua escapa del compartimiento donde la concentración de soluto es mayor (compartimiento A). Esta es la base de la técnica de obtención de agua potable a partir de agua salada.

Caso 1: No electrolitos. La presión osmótica de una solución de solutos tal como la glucosa, se describe para cada compartimiento del experimento planteado anteriormente como:

$$P_{osm} = M\,RT$$

donde M es la molaridad, R la constante universal de los gases y T la temperatura en grados Kelvin. Esta expresión es conocida como Ley de Van't Hoff y tiene la misma estructura matemática que la ley de Clapeyron para los gases ideales y nos indica que el soluto se comporta, en la generación de presión, como si ocupara todo el volumen de la solución. El flujo osmótico (flujo de agua) ocurre en general, para cualquier tipo de soluto, desde la región de menor presión osmótica a la de mayor presión. Asi, el flujo cesa cuando las presiones osmóticas se han igualado. En el caso particular, de un soluto no disociable (no electrolito) esto es equivalente, en virtud de la expresión $P_{osm} = MRT$ a afirmar que dicho flujo ocurre desde la región de menor concentración a la de mayor concentración.

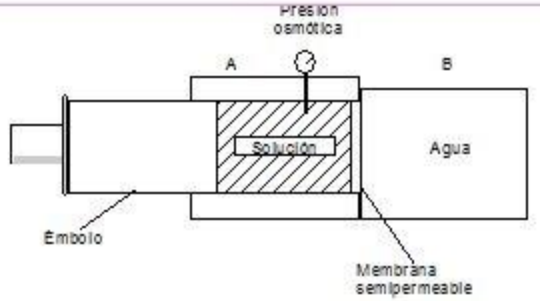


Fig.17: Representación esquemática de la definición de presión osmótica. Cuando la presión hidrostática aplicada a la solución de la cámara A, es igual a la presión osmótica de dicha solución, deja de haber flujo neto de agua desde B hasta A a través de la membrana. Ref. [3].

Caso 2: Electrolitos completamente impermeables.

En el caso de electrolitos completamente disociables y que lo hacen en iones para los cuales la membrana es completamente impermeable obtenemos:

$$P_{osm} = RT\,M_1 + RT\,M_2$$

donde M_1 y M_2 son las molaridades de cada ión. Esta expresión también puede escribirse como:

$$P_{osm} = RT\,(M_1 + M_2)$$

donde $M_1 + M_2$ es la Osmolaridad de la solución. Si conocemos la fórmula molecular del electrolito que le dió origen a los iones y su molaridad (M), entonces la presión osmótica puede calcularse como:

$$P_{osm} = i\,RT\,M$$

ya que $M_1 + M_2 = iM$ donde i es el coeficiente de disociación del electrolito, es decir, el número de iones que se producen cuando una molécula del electrolito se disocia. Si el electrolito es el cloruro de sodio (NaCl), i tendrá el valor de 2 y si es el cloruro de calcio ($CaCl_2$), su valor será 3.

Caso 3: No electrolitos parcialmente permeables.

En el caso de no electrolitos que son parcialmente permeables, la presión

MUY INTERESANTE

DIALISIS

La diálisis se utiliza en Medicina para eliminar diversas sustancias de la sangre o de la linfa utilizando la propiedad de dichas sustancias de atravesar una membrana semipermeable externa (diálisis extracorpórea, hemodiálisis o riñon artificial) o interna como el peritoneo (diálisis peritoneal). Dicha membrana es continuamente lavada por una solución dializante (dializado). Se utiliza para eliminar venenos y cantidades excesivas de fármacos, corregir desequilibrios hidroelectrolíticos y ácido-básicos graves; así como la eliminación de urea, ácido úrico y creatinina. La diálisis se utiliza en pacientes con insuficiencia renal aguda o crónica.

En la diálisis ocurren por lo menos tres procesos físicos: difusión, ósmosis y ultrafiltración. Los productos de desecho difunden a través de la membrana desde la región de mayor concentración a menor concentración hasta que se alcanza el equilibrio. Por ejemplo, en el caso de insuficiencia renal, la cantidad de potasio en el líquido extracelular se incrementa; si un sujeto en tales condiciones es dializado, el potasio fluirá hacia el líquido dializante y la concentración de potasio en este líquido se ajusta hasta que la concentración de potasio en el líquido extracelular sea la normal. La remoción de fluido se puede realizar también mediante ósmosis o ultrafiltración. Por ejemplo, durante la diálisis peritoneal, la presión osmótica se puede modificar, alterando la concentración de glucosa en el fluido dializador. Una concentración de glucosa al 7% removerá grandes cantidades de fluido extracelular con cada intercambio. Una forma alternativa de remover el fluido extracelular, se utiliza en hemodiálisis y consiste en incrementar la presión hidrostática de la sangre en relación a la del dializador, de esta forma la sangre se ultrafiltra y por consiguiente se concentra.

osmótica está afectada por un coeficiente de reflexión σ que indica el grado de permeabilidad de la membrana celular (si $\sigma = 1$, la partícula no pasa la membrana y si $\sigma = 0$, la partícula pasa libremente y no contribuye a la presión osmótica; cualquier valor intermedio de σ es posible). Así, la presión osmótica tendrá la forma:

$$P_{osm} = \sigma M R T$$

De esta manera, la presión osmótica será máxima si la sustancia no atraviesa la membrana y será nula si la atraviesa libremente.

Caso 4: Electrolitos parcialmente permeables.

En el caso de electrolitos que se disocian en iones con diferentes coeficientes de reflexión, la presión osmótica tendrá la forma:

$$P_{osme} = RT (\sigma_1 M_1 + \sigma_2 M_2)$$

donde P_{osme} es la presión osmótica efectiva y M_1 y M_2 son las molaridades de cada uno de los iones. El factor $(\sigma_1 M_1 + \sigma_2 M_2)$ se conoce con el nombre de molaridad total efectiva (Osmolaridad efectiva), y, en general, es diferente a la molaridad total, $M_1 + M_2$.

Caso 5: Solución preparada a partir de un electrolito que se disocia parcialmente con coeficientes de reflexión unitarios para todas las especies que genera (impermeabilidad completa).

En este caso la presión osmótica se calcula como:

$$p_{osm} = [i\beta + (1-\beta)] RT M$$

el factor entre corchetes $[i\beta + (1-\beta)] = [1+ \beta (i-1)]$ que ya ha aparecido en otras oportunidades, es conocido como factor de Van't Hoff. La expresión anterior puede ser generalizada para el caso en el cual los iones que se produzcan y el electrolito no disociado presenten coeficientes de reflexión diferentes de la unidad. Así tendremos que:

$$p_{osm} = i\beta RT\sigma_1 M + i (1-\beta) RT\sigma_2 M$$

Presión osmótica absoluta del plasma

Se calcula mediante la expresión:

$$P_{osma} = RT \text{ (Osmolalidad)} = 7,3 \text{ atmósferas} = 5548 \text{ mm de Hg}$$

Este valor difiere muy poco del encontrado para la presión osmótica del fluido intersticial. En realidad, la presión osmótica plasmática es superior a la del intersticio sólo en 25 mm de Hg debido a la presión osmótica de las proteínas plasmáticas (presión oncótica o presión coloideosmótica).

XII. TONICIDAD

Este término se utiliza para referirnos a la presión osmótica de una solución y no siempre es equivalente al término osmolaridad u osmoticidad, ya que existen casos en los cuales la presión osmótica no depende de la molaridad total (osmolaridad) sino que depende de la osmolaridad efectiva que es función tanto de las molaridades de las partículas como de sus coeficientes de reflexión (si este coeficiente es la unidad, la membrana no deja pasar la partícula, y si es cero, la partícula pasa libremente a través de ella). Solamente, si los coeficientes de reflexión de las partículas independientes (osmóticamente activas) para una determinada membrana, son la unidad, el término tonicidad es equivalente a los términos osmolaridad u osmoticidad. Para ilustrar este hecho realizaremos dos experimentos:

Nota: aunque los iones Na^+, K^+ y Cl^- se intercambian con bastante libertad a través de la membrana celular del eritrocito, los movimientos trasmembrana netos de la sal son lentos, por lo tanto en experimentos osmóticos de duración relativamente breve, se les puede considerar solutos no penetrantes ($\sigma = 1$).

Experimento 1: suspenderemos eritrocitos humanos con una concentración osmolal (concentración osmótica total) citoplasmática de 290 miliosmoles / litro de agua (que es igual a la del plasma) en una solución de NaCl de la misma osmolalidad –solución fisiológica– (unos 145 milimolal), es decir, que es isosmótica con el líquido citoplasmático (o equivalentemente con el plasma). Se observa que el volumen de los eritrocitos no se modifica y por ello la solución de NaCl usada es isotónica con el plasma. Como hemos dicho anteriormente estas dos soluciones son también isosmóticas. Así, las concentraciones de NaCl menores que 290 mOsmolal, serán hiposmóticas respecto al plasma y se observa que causan un aumento de volumen del eritrocito (turgencia y tumefacción) por lo cual serán también hipotónicas con el plasma. Aquellas soluciones de NaCl con concentraciones mayores que 290 mOsmolal serán hiperosmóticas e hipertónicas con el plasma y causarán retracción (disminución de volumen)

del eritrocito.

Experimento 2: Suspendemos eritrocitos humanos en una solución isosmótica (290 mOsmolal) de urea. Observaremos un flujo osmótico que penetra al interior celular que produce un hinchamiento de los eritrocitos con rapidez y en muy poco tiempo se hemolizan. ¿Por qué ocurre el flujo osmótico a pesar de que no existe gradiente de concentración trasmembrana? Porque el flujo osmótico depende de la diferencia de presión osmótica de la solución (P_{osms}) y la correspondiente al interior del eritrocito (P_{osmer}):

$$\text{Flujo osmótico} = K\,(P_{osmer} - P_{osms})$$

con: $P_{osmer} = RT \cdot \text{Osmolalidad}_{er} = RT \cdot 290$

y $P_{osms} = RT\,\sigma \cdot \text{Osmolalidad}_{s} = RT \cdot 0{,}62 \cdot 290 = RT \cdot 179{,}8$

Evidentemente como las presiones osmóticas no son iguales (debido a que el coeficiente de reflexión de la urea no es la unidad como en el caso del Na^+ y el Cl^-, sino que es 0,62, es decir que la membrana no es completamente impermeable a ella) existirá un flujo osmótico de agua y de urea que aumentará el volumen celular. La solución de urea, en este caso es hipotónica con el plasma pero es isosmótica con él. Así la tonicidad de una solución respecto a una determinada membrana es un término que se define en función de la presión osmótica, o equivalentemente, en términos del flujo osmótico o bien del cambio de volumen que experimenta un compartimiento a expensas del otro. Utilizando este criterio una solución será isotónica con el plasma si un eritrocito suspendido en ella no experimenta cambio en su volumen. Una solución será hipertónica respecto al plasma si un eritrocito suspendido en ella experimenta una disminución de su volumen. Una solución será hipotónica respecto al plasma si un eritrocito suspendido en ella experimenta un aumento de su volumen. (Ver fig. 18).

XIII. LEY DE LA DIFUSIÓN (Ley de Fick)

Esta ley establece una relación entre la tasa de partículas (velocidad de difusión, V_d: número de partículas / unidad de tiempo) que se mueven de un lugar a otro en términos del gradiente de concentración de partículas (variación de la concentración por unidad de longitud). En términos formales:

$$\dot{N} = \Delta N / \Delta t = - D A \ (\Delta C / \Delta x)$$

donde N, t, D, A, C y x son el número de particulas, el tiempo, la constante de difusión, el área de intercambio, la concentración y la longitud respectivamente. El signo menos indica que las particulas difunden desde la región de mayor concentración hacia la de menor concentración, es decir en el "sentido de menos el gradiente" y no como se dice en muchos textos de fisiologia en el "sentido del gradiente". Como un ejercicio de análisis dimensional, el lector puede tratar de encontrar las dimensiones y unidades de la constante de difusión. Si tenemos una membrana impermeable al agua

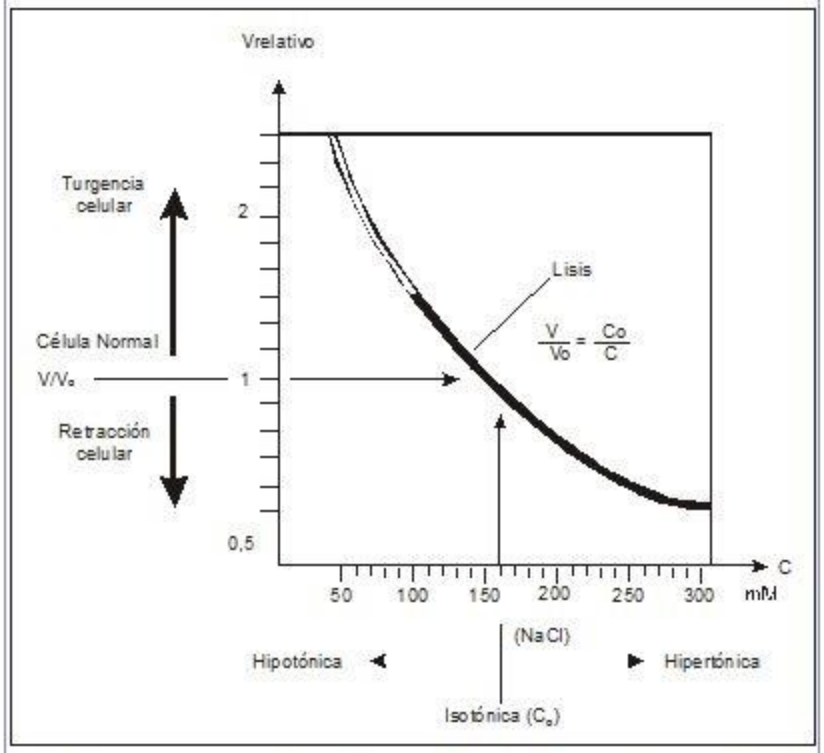


Fig. 18: Corportamiento osmótico de los glóbulos rojos humanos en una solución de NaCl. A 154 mM de NaCl (isotónica), el eritrocito presenta su volumen normal. En soluciones más concentradas (hipertónicas), se contrae, y en soluciones menos concentradas (hipotónicas), se hincha. Ref. [3].

TABLA XI

COEFICIENTES OSMÓTICOS (β) DE ALGUNOS SOLUTOS DE INTERÉS FISIOLÓGICO Ref. [3].

Sustancia	*i*	*Peso molecular*	β
NaCl	2	58,3	0,93
KCl	2	74,6	0,92
HCl	2	36,6	0,95
NH_4Cl	2	53,5	0,92
$NaHCO_3$	2	84,0	0,96
$NaNO_3$	2	85,0	0,90
KSCN	2	97,2	0,91
KH_2PO_4	2	136,0	0,87
$CaCl_2$	3	111,0	0,86
$MgCl_2$	3	95,2	0,89
Na_2SO_4	3	142,0	0,74
K_2SO_4	3	174,0	0,74
$MgSO_4$	2	120,0	0,58
Glucosa	1	180,0	0,00
Sacarosa	1	342,0	0,00
Maltosa	1	342,0	0,00
Lactosa	1	342,0	0,00

pero permeable al soluto, este pasará en forma neta desde el compartimiento A (donde está más concentrado) hacia el B, hasta que se igualen las concentraciones. Esto ocurre, a pesar de que la probabilidad de que una molécula que está en el lado A pase al lado B es igual a la probabilidad de que una molécula que está en el lado B pase al lado A, tal como se infiere del estado de movimiento aleatorio (browniano) de las moléculas. Dado que hay más moléculas en el lado A que en el lado B, habrá una velocidad de difusión neta de particulas desde A hacia B.

La permeabilidad P* de la membrana se define como:

$$P^* = D / \Delta x$$

donde Δx es el espesor de la membrana.

Cuando las particulas que difunden pertenecen a un gas (ver fig. 20), que

deben atravesar una membrana (como la barrera alvéolo-capilar o el endotelio de los capilares sistémicos) y alcanzar un compartimiento donde existe un medio liquido (como la sangre) en el cual el gas presenta una cierta solubilidad s, entonces la constante de difusión del gas se puede escribir como:

$$D = s\,T\,/\,\sqrt{M}$$

donde T es la temperatura absoluta y M su peso atómico-g o su peso molecular-g. Además, en este caso la ley de Fick puede escribirse como:

$$\dot{N} = \Delta N / \Delta t = -D\,A\,(\Delta p / \Delta x)$$

donde p es la presión del gas.

Cuando depositamos una dispersión macromolecular (ver fig. 19) que además contiene pequeños solutos en un recipiente constituido con un material poroso, tal que sus poros impidan el paso de las macromoléculas pero permitan el paso de los pequeños solutos, ocurre una diálisis. Por

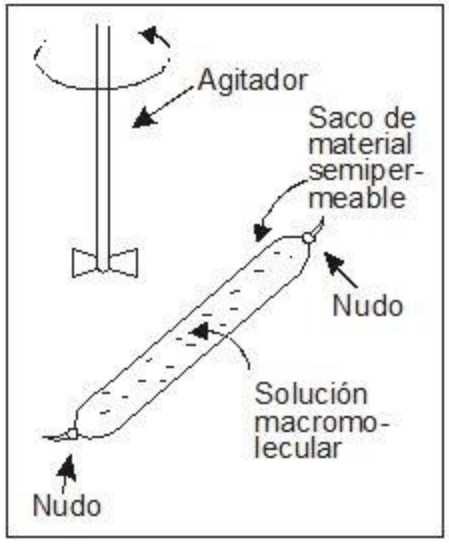
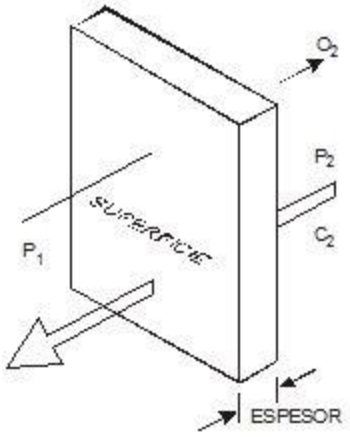


Fig. 19: Saco de colodión con una suspensión macromolecular y de pequeños solutos en su interior.

este mecanismo se modifica la composición de pequeños solutos de la solución del recipiente. Por ejemplo, si sumergimos en agua destilada, un recipiente con una membrana de colodión, que contiene una dispersión macromolecular con pequeños solutos, sólo éstos atravesarán la membrana y presentarán difusión a través de la misma, debido a la diferencia de concentración entre el interior y el exterior de la membrana. Si periódicamente, cambiamos el liquido exterior por agua destilada se puede depurar la solución interna de la sal. Para incrementar la depuración se puede aumentar la temperatura de la solución externa, por ejemplo con un agitador. En Medicina ocurren dos procesos en los cuales ocurre la diálisis: la diálisis extracorpórea o hemodiálisis (riñón artificial) que utiliza una membrana artificial que separa dos compartimientos, en uno circula la sangre del sujeto con insuficiencia renal y el otro contiene un liquido dializador. El otro proceso se denomina diálisis peritoneal o intracorpórea y aqui la membrana utilizada es el peritoneo (membrana que recubre los órganos abdominales) en cuya cavidad se deposita el liquido dializante.



$$\dot{N}gas \propto \frac{A}{E} \cdot D \cdot (P_1 - P_2)$$

$$D \propto \frac{sol}{(p.m.}$$

Fig. 20: Difusión a través de una lámina de tejido. La cantidad de gas transferido por unidad de tiempo ($\dot{N} = \frac{dN}{dt}$) es directamente proporcional a la superficie, a una constante de difusión y a la diferencia de la presión parcial, e inversamente proporcional al espesor (E). La constante es proporcional a la solubilidad (sol) de gas, pero inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su peso molecular (p.m.) Ref. [23].

XIV. ÍNDICE DE HIDRÓGENO

Este término se conoce también como el pH. Se utiliza para simplificar la forma de expresar la concentración de los iones hidrógeno. Sörensen, en 1909, introdujo una magnitud que representa al negativo del logaritmo de la concentración de los iones de hidrógeno. Simbólicamente:

$$pH = -\log [H^+] = \log (1 / [H^+])$$

En un medio acuoso se cumple que el producto iónico del agua k_{agua} es:

$$k_{agua} = [H^+]\ [OH^-]$$

A 25 °C, k_{agua} es igual a: $1x\ 10^{-14}$

En agua pura: $[H^+] = [OH^-]$

Así que: $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$ Molar

y el pH será igual a 7. Insistimos en que este valor corresponde al agua pura 25 °C.

En principio, se puede utilizar también el índice de hidroxilo, pOH. En el agua pura, el pOH a 25 °C, es también igual a 7. En una solución acuosa a una temperatura determinada se cumplirá que:

$$pH + pOH = \text{constante}$$

En un medio acuoso a 25° C, esta constante tiene un valor de 14. Por ello, para caracterizar la acidez y basicidad de las soluciones acuosas es suficiente conocer únicamente el pH.

En soluciones ácidas, $[H^+] > 10^{-7}$, de donde, $pH < 7$. Y, al contrario en soluciones alcalinas, $[H^+] < 10^{-7}$, de donde $pH > 7$.

En la práctica es raro que el valor del pH sea negativo. Por ejemplo, si $[H^+] = 1$, $pH = 0$; sólo a $[H^+] = 10$, el pH alcanza un valor de -1. La concentración de los iones de hidrógeno correspondiente a $pH = -1$, es muy grande y se encuentra raras veces. La concentración correspondiente a un $pH = -2$ es sencillamente imposible. El pH del plasma a 20 °C es 7,4 que corresponde a una concentración de hidrogeniones de $4x\ 10^{-8}$ M o equivalentemente 40 nanomoles / litro.

XV. LEYES DE LOS GASES

Existen diversas leyes que han sido descubiertas a través de la historia y que describen el comportamiento de los gases en diversas condiciones. Entre las leyes más importantes están la de Clapeyron (1799-1864), Boyle-Mariotte (1662, B; 1676, M), Charles-Gay Lussac (1787 Ch, 1808 GL), Dalton (1801), Henry (1775-1836) y Graham (1846).

La fisiología respiratoria involucra numerosas aplicaciones de las propiedades fundamentales de los gases y de las leyes físicas que determinan su comportamiento. Estas leyes involucran a las propiedades (temperatura, humedad, presión parcial, etc.) de los gases que respiramos, a la ventilación (compresión y descompresión de gases, presión necesaria para producir flujo, resistencia de las vías aéreas, etc.) y a la difusión de gases a través de membranas (alvéolo-capilar, endotelio capilar, etc.).

De acuerdo al grado de confinamiento, es decir a la presión a la cual están sometidos, los gases se clasifican en: ideales y reales. Los primeros están en condiciones de enrarecimiento (bajas presiones, es decir una masa de gas relativamente pequeña ocupando un gran volumen), es decir, sometidos a bajas presiones; mientras que los reales son aquellos sometidos a altas presiones (obedecen a la ley de van der Waals).

a.1) Humedad absoluta

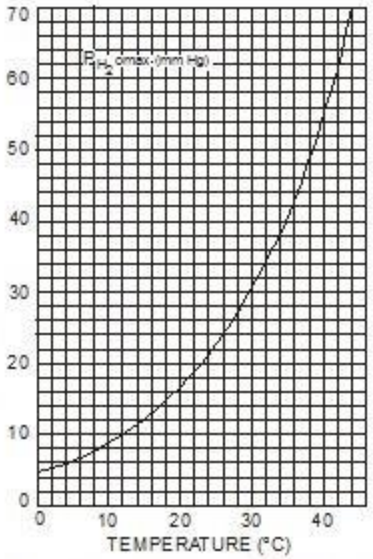
Este término se refiere a la masa de vapor de agua por unidad de volumen de aire, expresada usualmente en gramos/m^3. A una presión dada, la capacidad del aire para contener vapor de agua es una función de la temperatura del aire. La presión de vapor de agua máxima que puede tener un gas a una temperatura dada recibe el nombre de presión de vapor saturado para el agua y es igual a la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura. (ver tabla XII).

TABLA XII
PRESIÓN DE VAPOR SATURADO PARA EL AGUA (PVS)

A	B
Temperatura (°C)	*PVS (mm de Hg)*
0	4,58
10	9,21
20	17,55
30	31,86
40	55,3
60	149
80	355
90	526
100	760

a-i) Humedad relativa

Este término se define como el cociente entre la presión de vapor de agua que existe en un gas a una temperatura dada y la presión de vapor saturado a la misma temperatura. Este es un concepto importante en Fisiología. La evaporación del agua en la superficie de la piel humana necesita energía



Presión parcial máxima de vapor de agua en el aire (100% de humedad relativa) como una función de la temperatura.

térmica y esta es suministrada por el cuerpo. En los días calurosos esta pérdida de calor actúa como un mecanismo homeostático para mantener la temperatura corporal. Si la humedad relativa es alta, por ejemplo 85% o más, la evaporación neta es pequeña y ocurrirá menos enfriamiento. Una cifra deseable es del 50%. La presión de vapor de agua en una mezcla gaseosa puede determinarse, cuando se conoce la humedad relativa de la mezcla como:

$$P_{\text{vapor mezcla}} = H_r \cdot p_{\text{vapor máxima}}$$

a-ii) Ley de Clapeyron (ley de los gases ideales)

Esta ley relaciona a la presión del gas (p), el volumen ocupado (V), el número de moles n, la temperatura en grados Kelvin (T) y la constante universal de los gases R (0,082 atm. lit / K. mol; 1,98 cal / K. mol). Esta ley para el caso de los gases ideales se representa por la siguiente fórmula:

$$pV = nRT$$

o bien:

$$p = (n/V)\,RT = (m/M^*)\,(1/V)\,RT$$

que puede reescribirse, de la siguiente forma:

$$p = (D/M^*)\,RT$$

donde D es la densidad y M* es el peso atómico-g o molecular-g del gas. La ley de los gases es empleada frecuentemente para corregir los volúmenes de gas de acuerdo con los cambios de presión de vapor de agua y la temperatura. Por ejemplo, en la ventilación pulmonar se utilizan volúmenes de gas determinados a la temperatura corporal (37 °C o 310 K), a presión ambiental y con saturación de vapor de agua. Estas condiciones se denominan TCPAS. Los volúmenes de gas determinados a la temperatura de 0 °C (o 273 K), a la presión de aire 760 mm de Hg y en condiciones de sequedad, se denominan volúmenes estándar (TPE). Para convertir un volumen gaseoso que está inicialmente en condiciones TCPAS a condiciones estándard utilizamos la siguiente fórmula:

$$V_{TPE} = (273/310) \cdot [\,(P_B - P_{vagua})\,/\,760\,] \cdot V_{TCPAS}$$

donde P_B es la presión total ambiental de la mezcla gaseosa (que es igual a la

presión parcial de aire seco ambiental más la presión parcial del vapor de agua en esa mezcla, $P_{vagua} = H_r \cdot P_{vagua}^{MAX}$ donde H_r es la humedad relativa del aire y p_{vagua} es la presión de vapor del agua en la mezcla a la temperatura de la misma. A la temperatura corporal (37 °C), y si existe saturación del aire (humedad relativa del 100%), esta presión (P_{vagua}) tiene el valor 47 mm de Hg que es igual a la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura.

Si aplicamos la ley de los gases ideales a dos gases diferentes, obtenemos:

$$p_1 V_1 = n_1 R T_1$$
$$p_2 V_2 = n_2 R T_2$$

Si el número de moles de ambos gases es el mismo, obtenemos:

$$(p_1 V_1) / T_1 = (p_2 V_2) / T_2$$

Si en lugar de ser dos gases diferentes, se trata del mismo gas sometido a condiciones distintas pero manteniendo constante el número de moles, las expresiones anteriores se transforman en:

$$p_1 V_1 = n R T_1$$

$$p_2 V_2 = n R T_2$$

Dividiendo ambas expresiones, obtenemos:

$$(p_1 V_1) / (p_2 V_2) = T_1 / T_2$$

o equivalentemente:

$$(p_1 V_1) / T_1 = (p_2 V_2) / T_2$$

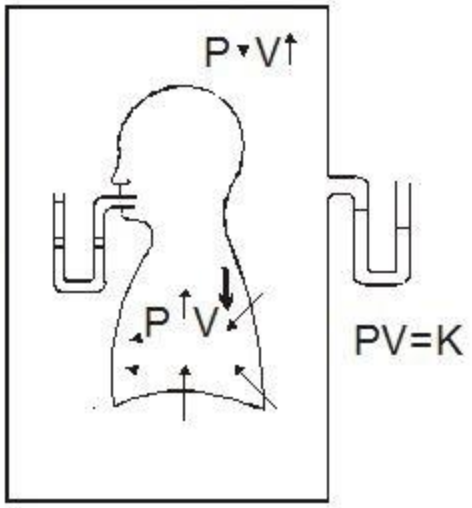


Fig. 20B: Medición de la CFR con el pletismógrafo corporal. Cuando el sujeto realiza un esfuerzo espiratorio contra una vía aérea cerrada, reduce el volumen de su pulmón, la presión en la vía aérea aumenta y la presión en la cabina desciende. De acuerdo con la ley de Boyle, se obtiene el volumen pulmonar. Ref. [23].

o bien: $(pV) / T = \text{constante}$

que es el mismo resultado que se obtiene en el caso de un gas confinado en un recipiente cerrado, donde el gas no puede cambiar su masa (o número de moles).

b) Ley de Boyle - Mariotte

Si se considera que la temperatura del gas es constante (condición isotérmica) y dicho gas mantiene un número de moles constante, se obtiene que:

$$pV = n R T = \text{constante}$$

o equivalentemente:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

que se denomina Ley de Boyle-Mariotte. Esta ley permite entender el movimiento de gases entre el exterior y el pulmón. Durante la inspiración, la expansión del tórax produce una disminución de la presión (presión subatmosférica) dentro del pulmón, generándose un flujo de aire hacia el pulmón. Durante la espiración, la compresión del gas dentro del pulmón (presión supraatmosférica) produce un flujo hacia el exterior. Esta ley permite describir el efecto que la inmersión tiene sobre el volumen del pulmón. Las observaciones nos permiten concluir que el volumen del pulmón se duplica cuando se asciende desde 10 metros hacia la superficie. Es por esto esencial que el submarinista continúe exhalando suavemente mientras ascienda.

Otro ejemplo en donde se aplica la ley de Boyle-Mariotte es la medición de la capacidad residual funcional utilizando un pletismógrafo corporal (ver figura 20B). El pletismógrafo es una caja hermética, parecida a una cabina telefónica, dentro de la cual se sienta al sujeto y se le invita a realizar esfuerzos respiratorios contra una boquilla cerrada. Al espirar, la presión y el volumen en los pulmones, aumenta y disminuye respectivamente, de acuerdo con la ley de B-M. El volumen gaseoso de la caja hermética aumenta y su presión disminuye respectivamente. Al inspirar, ocurre lo contrario. Aplicando la ley de Boyle a la caja, antes (situación 1) y después (situación 2) de un esfuerzo inspiratorio, obtenemos:

$$p_1 V_1 = p_2 (V_1 - \Delta V)$$

donde ΔV es el cambio de volumen de la caja hermética o del pulmón. El valor de ΔV será:

$$\Delta V = V_1 (p_2 - p_1) / p_2$$

Aplicando ahora la ley de Boyle al gas pulmonar, antes (situación 3) y después (situación 4) del esfuerzo inspiratorio:

$$p_3 V_3 = p_4 (V_3 + \Delta V)$$

donde V_3 es la capacidad residual funcional. Su valor será:

$$V_3 = CRF = p_4 \Delta V / (p_3 - p_4)$$

c) Ley de Charles-Gay-Lussac

Si mantenemos un gas a presión constante (condición isobárica) en un compartimiento cerrado (n = constante) entonces la ley de los gases ideales se escribirá como:

$$p / nR = T / V = \text{constante}$$

o bien:

$$T = \text{constante} \cdot V$$

lo cual significa que a mayor volumen ocupado por el gas, su temperatura también se incrementará, mientras que en el caso de la ley de Boyle-Mariotte, la relación es inversa: cuanto más pequeño sea el volumen ocupado por el gas, su presión es mayor.

Esta ley es usada frecuentemente durante los exámenes de función pulmonar en la cual se miden los volúmenes a temperatura ambiente y se convierten posteriormente a volumen del pulmón a temperatura corporal. Por ejemplo, si el exterior está a 50 °F bajo cero (-50 °F), un determinado volumen de aire al entrar al cuerpo, se calienta e incrementa su volumen en un 50%.

d) Ley de Gay-Lussac

Si mantenemos un gas, en un recipiente cerrado, a volumen constante, obtenemos a partir de la ley de Clapeyron:

$$P / T = \text{constante}$$

es decir, la presión varia directamente con la temperatura absoluta.

Esta ley tiene aplicaciones durante la medición de los gases sanguíneos en el laboratorio. Las muestras de sangre son muchas veces transportadas en hielo, a una temperatura aproximada de 0 °C. Luego, la muestra de sangre es inyectada hacia una máquina que calienta la sangre a la temperatura corporal (37 °C) y mide la presión parcial de los gases (O_2 y CO_2) en sangre. Cuando la muestra se calienta gradualmente, la presión ejercida por los gases en ella también se incrementa.

e) Ley de Avogadro

Dos gases diferentes, en recipientes diferentes y cerrados, sometidos a la misma temperatura y presión, ocupando el mismo volumen, poseen el mismo número de moles. Como un mol de cualquier gas contiene el mismo número de partículas, igual a $6,023 \times 10^{23}$, entonces, en las condiciones anteriores, los dos gases contendrán el mismo número de partículas (átomos o moléculas, según se trate de gases monoatómicos o poliatómicos).

El número $N = 6,023 \times 10^{23}$ se denomina actualmente número de Avogadro y ya nos hemos referido a él en otros lugares de esta monografía. A partir de la ley de los gases ($PV = n R T$) se deduce que un mol de cualquier gas en condiciones normales de temperatura y presión (1 atm y 273 K) ocupa 22,4 litros.

f) Ley de Dalton

Esta ley describe el comportamiento de una mezcla de gases (por ejemplo, el aire que respiramos). En dicha mezcla cada gas ejerce una presión como si el sólo ocupara todo el volumen del recipiente.

Sea una mezcla de gases en la cual el gas 1 ejerce una presión p_1 y el gas 2 una presión p_2, entonces:

$$p_1 . V = n_1 . RT$$

$$p_2 . V = n_2 . RT$$

Combinando ambas ecuaciones se obtiene:

$$(p_1 + p_2)\, V = (n_1 + n_2)\, RT$$

o equivalentemente:

$$p_T . V = n_t . R\, T$$

donde:

$$p_T = p_1 + p_2$$

Si se divide la expresión individual para cada gas:

$$p_i V = n_i R\, T$$

entre:

$$p_T\, V = n_T R\, T$$

el resultado es el siguiente:

$$p_i / p_T = n_i / n_T$$

o bien:

$$p_i = F_{molar\ i}\, P_T$$

donde:

$$Fmolar_i = n_i / (n_1 + n_2)$$

es la fracción molar del componente i de la mezcla.

En Fisiologia respiratoria, P_T es por convención la presión total de la mezcla gaseosa seca y Fmolar se refieren a la fracción molar del gas seco. Así la presión parcial de un componente del aire húmedo será:

$$p_i = (P_B - p_{agua}) . F_{molar}$$

con:

$$P_B = p_{O2} + p_{CO2} + p_{N2} + p_{agua}$$

A la temperatura de 37 °C, si el aire está saturado de vapor de agua, p_{agua} vale 47 mm de Hg. El agua existe fundamentalmente en estado liquido a temperatura ambiente. Sin embargo, las moléculas de agua se escapan constantemente desde su superficie para formar vapor de agua, que ejerce una presión parcial en la mezcla gaseosa.

Esta ley tiene importantes aplicaciones clínicas debido a que la presion ejercida por ciertos gases se puede alterar modificando la concentración

del gas. Específicamente, los pacientes conectados a fuentes de oxígeno y a respiradores (ventiladores) reciben oxigeno con una mayor fracción molar que un sujeto normal porque esto incrementa la presión parcial de este gas en el pulmón. Esto a su vez, facilita el movimiento de oxígeno hacia la sangre pulmonar e incrementa la cantidad total de oxigeno transportada hacia los tejidos.

Ejemplo:

¿Cuál es la presión parcial de oxigeno en la atmósfera terrestre a nivel del mar, suponiendo que el aire está seco?

$$pO_2 = 0{,}21 \cdot 760 \text{ mm de Hg} = 160 \text{ mm de Hg}$$

El pulmón humano se ha adaptado óptimamente a este valor. A alturas elevadas, la presión de oxigeno es menor y se produce una adaptación lenta a su escasez.

¿Cuál es la presión parcial de oxigeno en la atmósfera terrestre a nivel del mar, suponiendo que el aire está húmedo?

$$pO_{2\ a.h} = (F' \text{ x } 760 \text{ mm Hg}) < pO_{2\ a.s}$$

donde F'es la fracción molar del oxigeno correspondiente al aire húmedo y es menor a 0,21.

O también:

$$pO_{2\ a.h} = 0{,}21\ (760 \text{ mmHg} - P_{v.a})$$

g) Ley de Henry

Supongamos que tenemos dos compartimientos (1 y 2) en contacto a través de una membrana. Estos compartimientos están en equilibrio. En el compartimiento 1 existe una mezcla gaseosa, en la cual un determinado gas está a la presión parcial p. En el segundo compartimiento existe un liquido. En dicho liquido existe una cantidad de gas disuelto, con una concentración C. Esta cantidad de gas disuelto no está en estado liquido, sino que se aloja en los intersticios del liquido que lo contiene, conservando su estado gaseoso, en forma parecida a un soluto disuelto en un liquido. En el equilibrio, las presiones parciales de las moléculas del gas en las fases gaseosa y liquida son iguales. Por ejemplo,

MUY INTERESANTE

ALGUNAS APLICACIONES DE LA CONSERVACION DE LA ENERGIA EN FISIOLOGIA

1. LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Un sujeto sube una montaña de 1000 m de altura en 4 horas. La tasa de consumo de energia es 295 vatios. ¿Cuál es la tasa de calor producido durante el ejercicio?

Utilizando la primera ley de la termodinámica:

$$\Delta E = W + Q$$

Y convirtiendo a tasas:

$$\Delta E / t = W/\Delta t + Q/\Delta t$$

Asi que la tasa de calor será:

$$Q/\Delta t = (\Delta E/\Delta t) - (W/\Delta t)$$

El trabajo realizado por el sujeto será igual a la variación de energia gravitacional:

$$W = MgH = (50\,Kg)\ (9{,}8\ m/s^2)\ 1000m = 4{,}9 \times 10^5\ Joules$$

y la potencia mecánica será: $W / \Delta t = 4{,}9 \times 10^5$ Joles / 4 horas = 34 vatios

Asi la tasa de producción de calor será:

$$Q/\Delta t = 295\ vatios - 34\ vatios = 261\ vatios.$$

El calor producido se elimina a través de la vasodilatación y la sudoración.

2.- EL TEOREMA DEL TRABAJO Y LA ENERGÍA

El flujo de sangre a través de un segmento de arteria, despreciando las pérdidas de energia por fricción viscosa cumple con que el trabajo hecho por dicha fuerza es nulo:

$$W_{viscoso} = 0$$

Como este trabajo es igual a la variación de energia mecánica de un determinado volumen de sangre, entonces:

$$\Delta E_m = 0$$

Es decir, la energia mecánica de dicho volumen de sangre se conserva. Como esta energia mecánica en una determinada región de la arteria es:

$$Em = pV + MgH + (1/2)\ M V^2$$

donde el primer término del segundo miembro es la energia de presión, el segundo es la energia potencial gravitacional y el último la energia cinética. Dividiendo la expresión anterior entre V, obtenemos:

$$p + DgH + (1/2)\ D V^2 = constante$$

Esta última expresión se conoce con el nombre de Principio de Bernoulli y es usada en fisiologia cardiovascular.

supongamos que el gas es el oxigeno. Cuando la presión parcial de este gas en el compartimiento gaseoso es mayor que la presión parcial de O_2 en una fase liquida, ocurrirá una difusión neta del gas hacia el liquido, hasta que se igualen las presiones parciales, entonces se habrá alcanzado el equilibrio. El proceso contrario ocurre si la presión parcial del gas en la fase liquida es mayor que la correspondiente en la fase gaseosa. La ley de Henry establece que a una temperatura dada y a presiones parciales bajas del gas, la cantidad de éste que se disuelve en un liquido depende directamente de la presión parcial del gas. Simbólicamente:

$$C = s\ p$$

donde s es la solubilidad del gas, que depende inversamente con la temperatura. Esta ley no es válida si existe reacción química entre la fase gaseosa y la fase liquida. Cuando esto sucede puede ocurrir que la concentración del gas sea independiente de la presión parcial o bien que la concentración dependa de la presión, pero no en proporción directa.

Usualmente en Fisiologia la solubilidad se expresa en unidades de concentración del tipo V/ V:

a) mililitros de oxigeno disuelto / (1 ml de sangre x 760 mm de Hg)

o bien:

b) mililitros de oxigeno disuelto / (100 ml de sangre x 1 mm de Hg) =

$$= vol\,\% / mm\ de\ Hg$$

Utilizando este último tipo de unidad, la concentración de O_2 y CO_2 en sangre (t = 37°C) puede expresarse como:

$$vol\,\%\ (O_2) = P\ (O_2) \cdot 0{,}003\ vol\,\% / mm\ de\ Hg$$

$$vol\,\%\ (CO2) = P\ (CO2) \cdot 0{,}073\ vol\,\% / mm\ de\ Hg$$

h) Ley de Graham

Si hacemos uso de la primera ley de Fick, podemos establecer la siguiente expresión para calcular el cociente entre las velocidades de

difusión (Vd = N) de dos gases:

$$Vd_1 / Vd_2 = (s_1 T_1 \sqrt{M_2}) / (s_2 T_2 \sqrt{M_1})$$

lo cual significa que la velocidad de difusión de un gas a una presión y temperatura dada, es inversamente proporcional a la raiz cuadrada de su peso molecular, o equivalentemente inversamente proporcional a la raiz cuadrada de su densidad Esta ley puede considerarse como una aplicación de la teoria cinética de los gases: a una determinada temperatura, las particulas más pequeñas se mueven más rápido y colisionan con mayor frecuencia y por ello difunden más rápido. A continuación discutiremos los siguientes casos especiales:

a) Si no existe liquido en el trayecto de difusión del gas, por ejemplo cuando la mezcla gaseosa se mueve a través de las vias aéreas, las solubilidades de dos gases cualesquiera de la mezcla será:

$$s_1 = s_2 = 1$$

y si además suponemos que la temperatura es la misma para ambos gases, obtenemos para las velocidades de difusión:

$$Vd_1 / Vd_2 = \sqrt{M_2} / \sqrt{M_1}$$

Si suponemos que el gas 1 es el CO_2 y el gas 2 es el O_2, entonces:

$$Vd\ CO_2 / Vd\ O_2 = \sqrt{32} / \sqrt{44} = 0,85$$

lo cual significa que en las vias aéreas el dióxido de carbono difunde menos rápidamente que el oxigeno.

b) Existe liquido en el trayecto de difusión como en el caso de la difusión de aire a través de la barrera alvéolo-capilar. En este caso, suponiendo temperatura constante y el mismo gradiente de presión, obtenemos:

$$VdCO_2 / VdO_2 = (s\ CO_2 / s\ O_2)(\sqrt{MO_2} / \sqrt{MCO_2})$$

$$= (0,592 / 0,0244)(\sqrt{32} / \sqrt{44})$$

$$= 24 \cdot 0,85 = 20,6$$

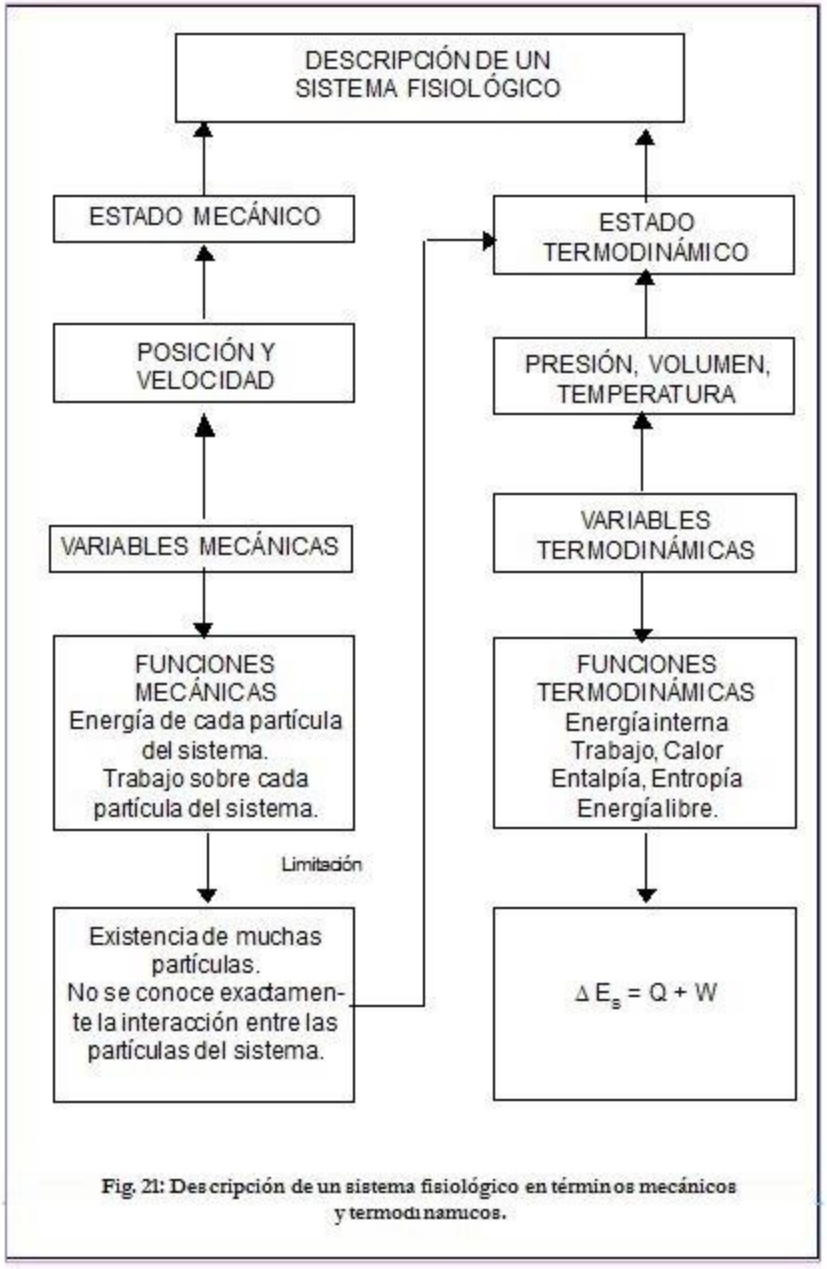


Fig. 21: Descripción de un sistema fisiológico en términos mecánicos y termodinamicos.

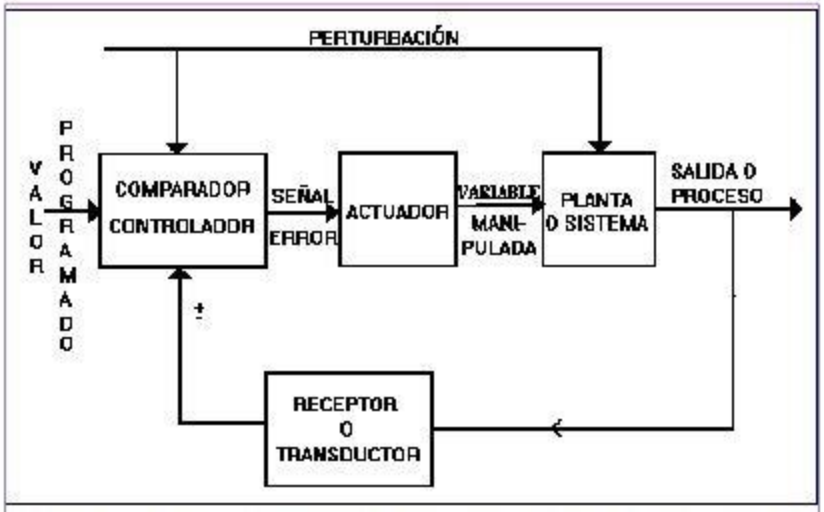


Fig. 22: La señal enviada por el controlador tiende a reducir (retroalimentación negativa) o aumentar (retroalimentación positiva) la diferencia entre el valor programado (característico de las diversas variables fisiológicas) y la salida. Esto es, la retroalimentación negativa (signo -) tiende a llevar la salida del sistema (variable fisiológica) al valor programado. Por el contrario, la retroalimentación positiva (signo +) tiende a alejar la variable fisiológica del valor programado.

Asi que el CO_2 difunde más rápidamente que el O_2 entre el alvéolo y la sangre capilar.

X. SISTEMA FISIOLÓGICO

a) Definición

Un sistema en general se define como cualquier región que interese a un investigador, donde exista interrelación de los elementos constituyentes que posean cierta coherencia para un propósito determinado. Un sistema fisiológico es un sistema que forme parte de un ser vivo. La selección de ese sistema está determinada entre otros factores por el interés del investigador, el nivel de complejidad biológica que se desee y las técnicas y métodos de los cuales

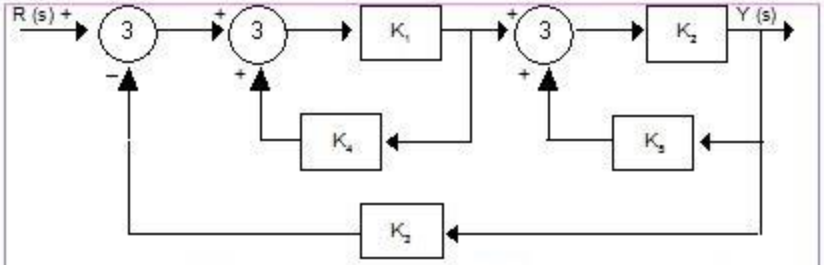


Fig. 23: Estructura de un sistema de control en multilazo. Los diversos sistemas de control con retroalimentación positiva forman parte de un lazo que los contiene que es de retroalimentación negativa.

se dispone. Un sistema fisiológico puede describirse mediante un conjunto formado por sus elementos, por las relaciones entre ellos y por los sistemas de control inherentes.

Los sistemas fisiológicos se pueden abordar desde diversos niveles de complejidad en el siguiente orden: átomo, molécula, macromolécula, organelo, célula, tejido, órgano y sistema de órganos.

Existe una definición restringida (muy utilizada en Medicina y que sirve de base algunas veces para definir el objeto de estudio de la Fisiologia) de sistema fisiológico que lo circunscribe a un sistema de órganos. Según esta definición sólo tiene sentido referirse al sistema respiratorio, cardiovascular, etc. Sin embargo, esta definición es muy limitada y muchos investigadores prefieren una visión mucho más amplia como la previamente señalada.

Para simplificar el estudio de un sistema, éste se puede dividir en sus elementos (cuando estos son complejos, se suelen denominar subsistemas) y así por ejemplo un sistema como el cardiovascular se puede

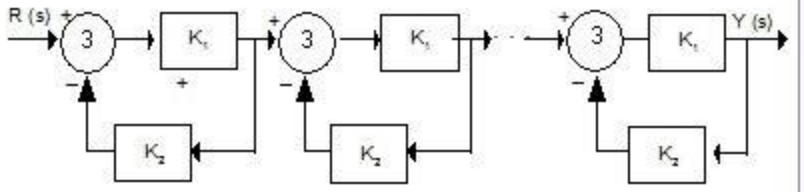


Fig. 24: Estructura en cascada de un sistema de control. Diversos sistemas de control con retroalimentación negativa están conectados en serie, de tal manera que la salida de uno de ellos, constituye la entrada del siguiente.

descomponer en corazón, vasos periféricos y pulmonares, y la sangre. El corazón también se puede subdividir en otro conjunto de elementos como podría ser el miocardio, la inervación simpática y parasimpática cardiaca, los vasos coronarios, músculos papilares, válvulas, etc. Y en el caso de los vasos sanguíneos periféricos en arterias, capilares y venas.

b) Formas de describir un sistema: mecánica y termodinámica

Un sistema fisiológico se describe mediante dos formas fundamentales (ver fig. 21). Una es la mecánica (newtoniana) que utiliza variables mecánicas como son la posición y la velocidad de sus partes constituyentes. Cuando el sistema fisiológico seleccionado es una célula, entonces si se conoce la posición y la velocidad inicial de una macromolécula dentro de ella, es posible conocer la posición y la velocidad final, de dicha macromolécula, siempre y cuando se conozca la fuerza que actúa sobre ella. Esta última exigencia es imposible de satisfacer dado el gran número de las otras moléculas que interactúan con ella. El trabajo total hecho por los alrededores sobre la macromolécula es igual a la variación de su energía cinética:

$$W_t = \Delta E_c$$

Para conocer este trabajo, es necesario conocer la fuerza total sobre ella lo cual es imposible, de nuevo, dado el gran número de macromoléculas presentes en una célula. Así, el abordaje de ciertos sistemas fisiológicos desde el punto de vista mecánico es inapropiado. Sin embargo, cuando se analizan los fluidos corporales como la sangre esta descripción es muy conveniente. También, cuando se hacen estudios biomecánicos, en donde interesa el movimiento total del cuerpo.

La otra forma de describir al sistema es la macroscópica o termo-dinámica. Esta descripción utiliza variables termodinámicas como presión, temperatura, volumen y un conjunto de funciones termodinámicas que dependen de ellas. Entre esas funciones están la energía interna, el trabajo, el calor, la entropía, la entalpía, la energía libre de Gibbs, etc.

Las funciones termodinámicas se pueden relacionar entre ellas, en particular, a través de las tres leyes de la termodinámica.

TABLA XIII

LOS RECEPTORES SENSITIVOS HUMANOS

Tipo de receptor	*Estímulo*	*Localización*
Tacto	Presión	Piel
Frío	Temperatura	Piel
Caliente	Temperatura	Piel
Temperatura	Cambios cerca de 37 °C	Hipotálamo
Dolor	Daño al tejido	Piel y otros sitios
Auditivo	Presión	Oído interno
Gusto	Químico	Lengua
Olfatorios	Químico	Nariz
Visual	Luz	Retina
Canales semicirculares, utrículo y sáculo	Aceleración rotacional y lineal	Oído interno
Quimiorreceptores	Químico	Arterias y bulbo raquídeo
Baroreceptores	Presión	Arterias y cavidades cardíacas
Cinestésicos	Ángulos	Articulaciones
Huso muscular	Estiramiento	Músculo Esquelético
Órgano tendinoso	Fuerza	Tendones

Fuente: Elaborado a partir de las referencias [3] y [6].

c) Propiedades de un sistema fisiológico

Un sistema fisiológico es un sistema dinámico-abierto porque sus estados están cambiando constantemente (dinamismo) e intercambia materia y energía con los alrededores (apertura). Algunas de sus propiedades (otras también importantes pueden ser estudiadas en Lenhinger, obra citada (Introducción: La lógica molecular de los organismos vivos) son las siguientes:

1. Importar, transformar y exportar energía. Capacidad para procesar la información (energía codificada)

El sistema recibe energía de los alrededores (alimentos), la procesa (transformación en energía metabólica), la utiliza (trabajo y calor) generando efectos sobre los alrededores (exportación de energía).

La información no es más que energía codificada. El ser humano la emplea de esa forma como en el caso de la propagación de los potenciales de acción, que constituyen energía codificada en forma de pulsos digitales de amplitud constante pero cuya frecuencia puede variar. De esta manera, la energía codificada se utiliza para la comunicación entre las diversas partes de un sistema y para la coodinación y la sincronización de los diversos eventos que ocurren en él.

2. Los seres vivos obedecen la segunda ley de la termodinámica.

La variación de entropía que ocurre en los seres vivos es negativa (denominada por diversos autores negantropía). La entropía (S) representa al grado de desorden de un sistema, a mayor entropía mayor desorden. La variación de entropía de un sistema fisiológico va a ser la diferencia entre la entropía final (S_f) y la entropía inicial (S_i). Esa variación de entropía en caso de un sistema fisiológico es negativa (a expensas del suministro externo de energía) y ello significa que la entropía final tiene que ser menor que la entropía inicial, o equivalentemente, el desorden final es menor que el desorden inicial. En otras palabras, el orden final es mayor que el orden inicial.

Asi, los seres vivos se ordenan desde el momento de su gestación hasta que llegan a la madurez y por eso presentan una variación de entropía negativa, lo que aparentemente viola el segundo principio de la termodinámica. Sin embargo, este principio afirma que la variación de entropía de un sistema debe ser positiva, pero para un sistema aislado y los sistemas fisiológicos no lo son. De modo que la producción de orden en un sistema fisiológico se logra a expensas de un desorden en los alrededores que es mayor en magnitud que el orden producido. En términos más formales, como el sistema y los alrededores forman un sistema aislado:

$$(\Delta S)_{ais} = [(\Delta S)_{sis} + (\Delta S)_a] \geq 0$$

con :

$$(\Delta S)_{sv} < 0$$

lo que implica que:

$$(\Delta S)_a > 0 \text{ y } (\Delta S)_a > |(\Delta S)_{sv}|$$

La variación de entropía negativa (ordenamiento) se mantiene, en un sujeto normal, desde la gestación hasta la madurez, pero una vez alcanzada ésta, se evoluciona hasta la muerte, en un proceso creciente de degeneración (desordenamiento).

3. Homeóstasis

Esta propiedad se refiere a que los sistemas fisiológicos están dotados de mecanismos regulatorios o de control que garantizan que las diversas variables fisicoquímicas (fisiológicas) se mantengan oscilando (lo más cerca posible) alrededor de un valor que está programado en determinadas regiones del cuerpo. Ello es así, para garantizar el funcionamiento armonioso del cuerpo humano. Por ejemplo en humanos, la presión arterial media se mantiene oscilando alrededor de 100 mm de Hg y la temperatura interna oscila alrededor de 37°C.

Se ha demostrado que hay procesos caóticos (dinámica no lineal) involucrados en la regulación de diversas variables fisiológicas y por tal razón algunos investigadores han acuñado el término caos biológico, como parte integrante de la homeóstasis dinámica.

Para que ocurra estabilidad de los sistemas fisiológicos, se hacen necesarios los sistemas de control. Ellos están constituidos por diversas partes (ver figs. 22, 23 y 24), las fundamentales son: el controlador, la variable fisiológica a ser controlada (salida del sistema), el punto programado (*set point* o *set up*, entrada del sistema) y el receptor. Este último, tiene por función medir la variable fisiológica continuamente y enviar esa información al controlador quien la compara con el punto programado. Si la señal (señal error) que genera el controlador corrige la desviación (causada por una perturbación interna o externa), el sistema de control funciona con retroalimentación negativa. Si la señal error conduce a un incremento o decremento creciente de la salida, el sistema de control funciona con retroalimentación positiva. En el cuerpo humano existen ambos tipos de sistemas de control, pero los fundamentales son los de retroalimentación

negativa y la operación de los positivos ocurre bajo el dominio de los negativos. La determinación de los lugares donde se asientan los puntos programados es un campo de investigación fisiológica de gran interés por sus implicaciones terapéuticas. En particular se ha determinado que en el hipotálamo está el termostato humano y en el bulbo raquideo se encuentra el barostato.

En el cuerpo humano existen diversos receptores (ver tabla VI), por ejemplo, los barorreceptores que están ubicados en las arterias y en las cavidades del corazón, los ubicados en el oido interno, especificamente en el aparato vestibular que detectan la aceleración corporal. Se puede medir temperatura, porque se cuenta con receptores para medir cambios térmicos (receptores para el frio y para el calor). Existen detectores de temperaturas internos muy especificos ubicados en el hipotálamo y en el poligono de Willis, que actúan como integrantes del sistema de control de la temperatura corporal. También, el organismo humano está en capacidad de medir fuerza a través del órgano tendinoso de Golgi, que está ubicado en los tendones. Se puede medir cambios de longitud en la fibra muscular mediante un receptor que es el huso muscular, ubicado en ella.

4. Adaptación (heteróstasis)

Los seres vivos por diversos procesos pueden modificar los valores programados de las diversas variables fisiológicas, como una respuesta a los cambios sostenidos que se producen en esas variables por efecto de perturbaciones internas o externas. Esa modificación es denominada adaptación. Esta ocurre también cuando se modifican los umbrales de excitación de los receptores. En algunos tipos de hipertensión se ha demostrado que hay adaptación en relación al controlador (bulbo raquideo) y/o de los barorreceptores. Algunos investigadores piensan que la adaptación se produce para evitar el stress al cual estaria sometido constantemente el sistema si la variable experimentara fuertes cambios, sin embargo, de esta manera se anula el control alrededor de los valores normales, lo cual conduce también a daños orgánicos.

5. Diferenciación y especialización de funciones

Los sistemas fisiológicos tienden a la diferenciación y por ende a la multiplicación, especialización y jerarquización de funciones. Como se describe en el Apéndice IV del Capítulo I, la materia en su evolución hacia la vida pasó por una serie de etapas cada una de mayor complejidad. Una vez aparecida la vida en forma de una célula (organismo unicelular), su función primordial es seguir existiendo en su ambiente particular, lo cual implica que cada una de sus partes deben adquirir algún tipo de especialización. Si observamos como a partir de esta célula primigenia han evolucionado los diferentes organismos, con multiplicidad de formas y funciones, debemos concluir que este proceso es posible por la potencialidad que tienen los organismos de especializar y jerarquizar sus funciones. Si tomamos como ejemplo un ser humano, podriamos analizarlo desde el punto de un sistema fisiológico, como subdividido en susbsistemas (sistema nervioso, sistema esquelético-motor, sistema circulatorio, sistema digestivo, sistema respiratorio, etc.), esos subsistemas se han especializado y jerarquizado en sus funciones, además han logrado coordinarse entre si. No debemos olvidar que esta especialización y jerarquización es reflejo, a su vez, de la especialización de sus células y, a su vez, de la especialización de cada uno de los organelos y macromoléculas que las constituyen.

PROBLEMAS Y PREGUNTAS*

I. PROBLEMAS

1. El espesor de una membrana celular es 100 Å ¿Cuál es su espesor en micras?

R: 0,01 micras

2. Defina los siguientes conceptos:

a) Magnitud base

b) Magnitud derivada

c) Unidad

d) Valor

3. Transformar 1 Atm. litro a Joules.

R: 100 joules

4. a) Calcule el valor de un osmol de NaCl en términos de moles de NaCl.

b) Efectúe el mismo cálculo para el $CaCl_2$.

c) Calcule el valor de un osmol de NaCl en gramos de NaCl (PM NaCl = 58,44 g)

d) Calcule el valor de un Osmol de $CaCl_2$ en gramos de $CaCl_2$ (PM $CaCl_2$ = 110,98 g).

R: a) 0,5 moles c) 29,22 g

b) 0,33 moles d) 36,62 g

5.a) La osmolaridad de una solución de NaCl es 300 miliosmoles/litro. Calcule su normalidad en miliequivalentes / litro.

b) Suponiendo que la solución es de $CaCl_2$, efectúe el mismo cálculo.

R: a) 150 mEq/ litro b) 200 mEq/ litro

6. ¿Cuál es el pH de una solución con $[H^+] = 3,4 \times 10^{-8}$ M?

R: 7,46

7. ¿Cuál es la concentración de hidrogeniones de una solución que tiene un pH de 5,2?

R = $0,6 \times 10^{-5}$ M

8. En soluciones acuosas el producto de las concentraciones de iones hidrógeno $[H^+]$ y de iones hidróxilo $[OH^-]$ es muy cercana a 10^{-14}. Sea

* Para las preguntas y problemas sobre soluciones se supone que la disociación del soluto es completa si no se da el valor del coeficiente de disociación.

la función F definida como: $F = [H^+] + [OH^-]$, obtenga el valor de $[H^+]$ que minimiza a F.

9. Convertir:

a) 3 cal a joules

b) 3 cal a electrón-voltio

R: a) 12, 54 joules

b) $7,5 \times 10^{19}$ eV

10. Si la osmolalidad del plasma es 300 miliosmoles/ kg de agua

a) Calcule la concentración en miliosmoles / litro de agua

R: 300 miliosmoles / litro de agua

b) Calcule la concentración en miliosmoles/ litro de plasma

R: 270 miliosmoles/ litro de plasma

c) Calcule la concentración en miliosmoles / litro de sangre

R: 148,5 miliosmoles / litro de sangre

d) Calcule el número de milimoles (totales) de particulas independientes / kg de agua que existen en el plasma.

R: 300 milimoles de particulas independientes / Kg de agua.

11. Calcule a) la molaridad, b) la osmolaridad de una solución de glucosa al 15%. (Peso molecular glucosa = 180 g).

R: a) 0, 83 M ; b) 0,83 osmoles/ litro

12. La concentración del ión calcio Ca^{++} en plasma es 4,6 mg %. Calcule su concentración en a) milimolar y b) mEq/litro de solución.

El peso atómico-g del calcio es 40 g.

R: a) 1,15 mM

b) 2, 3 mN

13. El producto comercial Normosol-R con dextrosa usado en el tratamiento intravenoso de las deshidrataciones, tiene la siguiente

composición:

Dextrosa (D-glucosa), 5g; Cloruro de sodio, 526 mg, Acetato de sodio, 222 mg, Gluconato de sodio, 502 mg; Cloruro de potasio, 37 mg; Cloruro de magnesio, 14 mg; agua para inyección, csp, 100 ml . El término csp significa que se ha agregado agua para completar los 100 ml de solución.

a) Convertir las concentraciones a milimoles / litro de solución.

b) Encontrar la miliosmolaridad de cada sustancia. c) calcule la miliosmolaridad del Normosol-R con dextrosa. Use las tablas X y XI. Suponga que el Acetato de sodio y el Gluconato de sodio tienen $\beta = 1$. d) Calcule la concentración total de Na^+ y de Cl^- en la solución en milimoles/litro. e) ¿Esta solución es eléctricamente neutra?

R: a) Las concentraciones en milimolar son: [NaCl] = 89,9 ; [Acetato de sodio] = 27; [Glucosa] = 278; [Gluconato de sodio] = 23 ; [KCl] = 4,96; [$MgCl_2$] = 1,47.

b) NaCl = 278 miliosmolar, acetato de sodio = 54 miliosmolar, glucosa = 278 miliosmolar, gluconato de sodio = 46 miliosmolar, KCl = 8,86 miliosmolar, $MgCl_2$ = 4,09 miliosmolar.

c) 564,65 miliosmolar.

d) La concentración total de sodio en la solución es 136,6 milimolar; la de cloruro es 96,14 milimolar.

e) En esta solución el único no electrolito es la glucosa que no posee carga neta, por lo cual ella no tiene efectos eléctricos sobre la solución. Para cada electrolito habrá una parte no disociada cuya carga neta será nula y la parte disociada producirá igual cantidad de cargas negativas que positivas, así la solución será neutra.

14. Se prepara una solución, uniendo 2 litros de una solución 200 miliosmolal y 3 litros de otra solución 300 miliosmolal. ¿Cuál es la osmolalidad de la solución resultante?

R: 260 miliosmolar

15. Se prepara una solución, uniendo 2 litros de una solución 200 miliosmolar y 3 litros de otra solución 300 miliosmolar. ¿Cuál es la osmolalidad de la solución resultante? Suponga que el volumen del solvente representa el 80% del volumen de cada solución.

R: 260 miliosmolal

16. Si las concentraciones plasmáticas molares de dos iones son iguales ¿lo serán también sus concentraciones molales? Si dos soluciones de solutos diferentes en el mismo solvente tienen la misma molaridad ¿tendrán la misma molalidad?

17. Se prepara una solución, uniendo dos soluciones: 2 litros de una solución de NaCl 200 mM con 4 litros de una solución de $CaCl_2$ 150 mM.

a) ¿Cuál es la osmolaridad de la solución resultante, suponiendo que la disociación de ambos electrolitos es completa?

b) ¿Cuál será la osmolaridad si ambos electrolitos tuvieran un coeficiente osmótico (o grado de disociación) de 0,9?

R: a) 433 miliosmolar

b) 406 miliosmolar

18. Cierta masa de gas ocupa 200 litros a 95 °C y 782 mm de Hg. ¿Cuál será el volumen ocupado por dicha masa de gas a 65 °C y 815 mm de Hg? Use la ley de los gases ideales.

R: 176, 2 litros

19. Una muestra de oxígeno húmedo, que ocupa 486 cm^3 a 20 °C y presión de 760 mm de Hg, presenta una humedad relativa del 80 %. ¿Cuál será el volumen ocupado por el oxígeno seco a 37 °C a la misma presión ? Use la ley de los gases y la ley de Dalton (ley de las presiones parciales).

R: 502 cm^3

20. A temperatura constante, cierta cantidad de gas ocupa 76,8 cm^3 a la presión de 772 mm de Hg ¿Cuál será su volumen a la presión de 760 mm de Hg? Use la ley de Boyle-Mariotte.

R: 78 cm^3

21. Una masa de gas ocupa 600 cm^3 a 25 °C. Si la presión se mantiene constante, ¿cuál será el volumen de dicha masa de gas a - 5 °C ? Use la ley de Charles-Gay-Lussac

R: 540 cm^3

22. Un tanque metálico contiene un gas a la temperatura de 20 °C y a la presión de 900 mm de Hg. La temperatura del gas se eleva a 200 °C. Suponiendo que no hay variación en el volumen del tanque, calcular la presión en el interior del mismo a esta nueva temperatura. Use la ley de Gay Lussac.

R: 1453 mm de Hg

23. Hallar la concentración en gramos/ litro de una solución de glucosa, $C_6H_{12}O_6$ que a 25 °C es isotónica con una solución de úrea, $CO(NH_2)_2$ a 12 °C, la cual contiene 3 g de urea en un volumen de 150 cm^3.

R: 57,36 g / 1000 ml

24. Encontrar la temperatura en la cual coinciden el valor en °C con el valor en °F.

R: -40°C

II. Preguntas. Selección simple (1 correcta)

1. Una de las siguientes unidades corresponde a la potencia mecánica y a la tasa metabólica de un sujeto para una determinada actividad física :

A. Caloria
B. Joule
C. Ergio
D. Joule / segundo
E. Joule / kilogramo

2. La energia posee una de las siguientes propiedades:

A. No se transforma
B. Puede aparecer como energia cinética y potencial
C. Se puede expresar en Newton
D. Se puede expresar en Pascal
E. Sus unidades son diferentes a las utilizadas para el calor y el trabajo.

3. El peso atómico o molecular de una sustancia no se puede expresar en:

A. Unidades de masa atómica (uma).

B. Daltons
C. Gramos
D. Litros
E. Kilogramos

4. Si la temperatura corporal de un sujeto es de 37 °C, entonces ella es equivalente a:

A. 32 grados Fahrenheit
B. 212 grados Fahrenheit
C. 310 grados Kelvin
D. 236 grados Kelvin
E. 273 grados Kelvin

5. El sistema de control más general de un sistema fisiológico no posee una de las siguientes propiedades:

A. Retroalimentación
B. Receptores
C. Es incapaz de controlar cuando actúan perturbaciones
D. Homeóstasis
E. Adaptación

6. Una de las siguientes magnitudes considera al número de moles totales que se obtienen cuando un electrolito se disocia en un kilogramo de solvente:

A. Molaridad
B. Molalidad
C. Osmolaridad
D. Normalidad
E. Osmolalidad

Seleccione las dos (2) respuestas correctas de las siguientes preguntas:

1. La energia química almacenada en los enlaces de ATP cuando se libera presenta una de las siguientes propiedades:

A. Se transforma solamente en calor
B. Se transforma unicamente en trabajo.

C. No se puede convertir en calor.
D. Se puede convertir en calor y trabajo
E. Se puede almacenar en los enlaces quimicos de otras moléculas.

2. Si la unidad de una determinada magnitud fisico-quimica se obtiene dividiendo la unidad de masa entre la unidad de volumen, entonces dicha magnitud puede representar a la :

A. Viscosidad de una solución
B. Densidad relativa de una solución
C. Densidad absoluta de una sustancia
D. Concentración de una solución
E. Fracción molar de un componente de una mezcla.

3. La presión hidrostática de un fluido y la tensión superficial (o elástica) poseen respectivamente unidades de:

A. Fuerza / superficie y fuerza / longitud
B. Energia / volumen y energia / superficie
C. Energia / masa y energia / volumen
D. Fuerza / volumen y fuerza / masa
E. Fuerza / superficie y fuerza / volumen

HECHO-RAZÓN

Indique su respuesta así:

A. Si 1 y 2 son verdaderas y 2 es la explicación de 1.
B. Si 1 y 2 son verdaderas pero 2 no es la explicación de 1.
C. Si 1 es verdadera y 2 es falsa.
D. Si 1 es falsa y 2 es verdadera
E. Si ambas son falsas

I.

1. Los seres vivos cumplen con la ley de conservación de la energia (primer principio de la termodinámica)

Porque

2. En los seres vivos, el consumo de energia metabólica siempre es igual a la suma del trabajo ejecutado, del calor liberado y de la energia acumulada

II.

1. Si dos soluciones de concentraciones diferentes de cloruro de sodio se someten a un proceso osmótico, dicho flujo cesará cuando se igualen las presiones osmóticas.

Porque

2. El flujo osmótico ocurre desde una región de mayor presión osmótica a una de menor presión osmótica.

III.

1. Los seres vivos desde su gestación hasta su madurez cumplen con el segundo principio de la termodinámica (el desorden de un sistema aislado es constante o siempre se incrementa).

2. En un sistema aislado (seres vivos + alrededores), los seres vivos se ordenan en esa etapa (gestación hasta madurez) a expensas de un desorden mayor de los alrededores, que es mayor en magnitud al ordenamiento de los seres vivos.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS ADICIONALES

1. Demuestre que los gases reales cumplen la ecuación de van der Waals:

$$(p + \frac{an^2}{V^2})\,(V - nb) = nRT$$

donde nb es el volumen total ocupado por las particulas y $a(n/V)^2$ es la reducción de la presión debido a las fuerzas atractivas entre particulas. La expresión anterior se puede reordenar en función del volumen molar:

$(V_m = \frac{V}{n})$ para dar lugar a: $p = [RT / (V_m - b)] - a / V^2_m$

Demuestre utilizando esta última expresión, que reordenándola, se obtiene la siguiente ecuación cúbica:

$$V_m^3 - (b + RT / p)\, V_m^2 + (a / p)\, V_m - (ab / p) = 0$$

Utilizando esta expresión, estime el volumen molar del nitrógeno a 500 K y 100 atm. Considere:

$$a = 1{,}390\ dm^6 \cdot atm \cdot mol^{-2}$$

y $$b = 3{,}913 \cdot 10^{-2}\ dm^3 \cdot mol^{-1}$$

Compare con el valor obtenido a partir de la ley de Clapeyron.
(pV = nRT).

2. Demuestre que para soluciones muy diluidas, la fracción molar del soluto F_{soluto} está relacionado con la molalidad (m) como:

$$F_{soluto} = (PM)(m)/1000$$

Donde PM es el peso molecular gramo del solvente.

3. Las soluciones poseen ciertas propiedades coligativas que son independientes de la composición química del sistema y en soluciones diluidas dependen únicamente de la fracción molar del soluto. Las propiedades coligativas son:

a) Disminucion de la presion de vapor del solvente.

b) Disminución del punto de congelación de la solución.

c) Elevación del punto de ebullición de la solución.

d) Presión osmótica.

El nombre coligativo indica que dada una de las cuatro propiedades, las otras tres pueden ser obtenidas mediante cálculo. Exprese matemáticamente cada una de las propiedades.

4. Demuetre que para soluciones binarias, es decir, un solvente con un único soluto, y considerando además un soluto no volátil, que no se asocia, disocia o interactúa con el solvente, es decir, un solvente ideal, que cumple la Ley de Raoult:

$$P^{solvente}_{solución} = P_{solvente\ puro}\,(1 - F_{soluto})$$

o bien:

$$\Delta P = P_{solvente\ puro} - P_{solvente\ solución} = F_{soluto} \cdot P_{solvente\ puro}$$

Donde P significa presión de vapor y F fracción molar.

Obtenga las otras propiedades coligativas a partir de esta ley.

5. Discuta los cuatro niveles de organización molecular de las proteinas.

6. Discuta las propiedades (fisicas y químicas) más importantes del agua.

7. Represente, en forma vectorial, la primera ley de Fick.

8. Obtenga la segunda ley de Fick a partir de la primera.

9. Utilizando la tabla siguiente:

a) Demuestre que se cumple la siguiente relación entre las diversas escalas de temperatura.

$$°C / 5 = (°F - 32) / 9 = (°K - 273)/5 = (°R-491)/9 = °Re/4$$

b) Complete los espacios en blanco correspondientes a la temperatura del interior del cuerpo humano.

Temperatura (1 atm)		*Agua*		*Temperatura Interior del Cuerpo Humano*
	Cero Absoluto	*Punto de Congelación*	*Punto de Ebullición*	
Celsius °C	–273,15	0	100	37
Kelvin K.	0	273,15	373,15	
Fahrenheit °F	– 459,67	32	212	
Rankine R.	0	491,67	671,67	
Réaumur Re	– 218,52	0	80	

b) En cada recuadro en blanco, coloque la fórmula que corresponda.

	Grados de Ebullición °C	*Grados Kelvin K*	*Grados Fahrenheit °F*	*Rankine R*	*Réaumur Re*
Celsius °C					
Kelvin K					
Fahrenheit °F					
Rankine R					
Réaumur Re					

10. Discuta algunas teorías sobre el origen exógeno de la vida en la Tierra.
11. Investigue sobre magnitudes intensivas y extensivas. Mencione ejemplos.
12. Construya una tabla donde indique sustancias que pasan a través de los poros y de la parte lipídica de la membrana celular. Ahora, suponga que tiene un arreglo de células (por ejemplo, el endotelio capilar). ¿Son posibles otros mecanismos de transporte?
13. En la siguiente tabla discuta cada uno de los fenómenos de transporte involucrados.

14. Enuncie y discuta las cuatro leyes de la termodinámica. Expréselas matemáticamente.
15. Discuta el significado de las siguientes funciones termodinámicas: entalpía (H); variación de entalpía ΔH; entropía (S); variación de entropía (ΔS); energía libre de Gibbs (G) y su variación (ΔG).
16. Investigue el comportamiento, en función de la temperatura, viscosidad, densidad y calor específico del agua.
17. Obtenga el Principio de Fick (PDF), de amplio uso en Fisiología Renal, que describe el transporte de partículas disueltas en un fluido a través del glomérulo renal. Deduzca a partir del PDF la Tasa de Filtración Glomerular (TFG) y su importancia fisológica y clínica. Explique las aproximaciones que deben realizarse para que la Depuración de Creatinina permita estimar la TFG.

Fenómeno	*Flujo de la propiedad de las partículas*	*Gradiente*	*Coeficiente*	*Ley*	*Expresión Aproximada del coeficiente*
Difusión	Número	$\frac{dn}{dx}$	Difusividad D	$J_n = -D \operatorname{grad} n$	$D = a\ \bar{c}\ l$
Conductividad térmica	Energía	$\frac{du}{dx} = C_v \frac{dT}{dx}$	Conductividad térmica K	$J_u = -K \operatorname{grad} T$	$K = a\ C_v\ \bar{c}\ l$
Viscosidad	Cantidad de movimiento transversal	$M \frac{dv_x}{dx}$	Viscosidad η	$\frac{F_x}{A^2} = J_p = -\eta \frac{dv_x}{dx}$	$\eta = a\ \rho\ \bar{c}\ l$
Conductividad eléctrica	Carga	$-\frac{d\varphi}{dx} = E_x$	Conductividad σ	$J_q = \sigma E$	$\sigma = \frac{nq^2 l}{M\bar{c}}$

Símbolos:
- n = número de partículas por unidad de volumen
- $\bar{c}$ = velocidad térmica media = $<|v|>$
- l = recorrido libre medio
- C_v = capacidad calorífica por unidad de volumen
- u = energía térmica media por unidad de volumen
- Fx / A = fuerza cortante por unidad de área
- φ = potencial electroestático
- E = intensidad del campo eléctrico
- q = carga eléctrica
- M = masa de la partícula
- ρ = masa por unidad de volumen
- J = flujo de A: cantidad neta de A transportada a través de la unidad de área en la unidad de tiempo.

REFERENCIAS

1. Adolph, E. Physiological adaptations: hypertrophies and superfunctions. American Scientist. Vol. 60, 1972, págs. 608-617.
2. Berghuis, P., Cohen, N., Decker, M., Gettinger, A., Myrabo, K., Nilsestuen, J., Strohl, K., Yount, J. Biophysical measurement series: Respiration. Space Labs.
3. Berne R. y M. Levy. Fisiologia. Mosby. España. 1992
4. Bushong. S. Manual de Radiologia para técnicos. 5ta edición. 1993. Mosby.
5. Frumento, A. S. Biofisica. Tercera edición. Mosby-Doyma. Madrid. 1995.
6. Ganong, W.F. Fisiologia Médica. Capitulo 1: Bases generales y celulares de la fisiologia médica. 19ªª edición. El manual moderno 2004.
7. Gontier, J. La Respiración. Paidotribo. Barcelona (España). 1986.
8. Guerasimov, Ya, Dreving, V., Eriomin, E., Kiseliov, A., Lebedev, V., Panchenkov, G., Shliguin, A. Curso de Quimica Fisica. Tomo II. Pags. 497-498. Mir. Moscú. 1977.
9. Hladik, J. La Biofisica. Fondo de Cultura Económica. México. 1982.
10. Ibarz, J. Problemas de Quimica General. Editora Nacional. México.
11. Jensen, D. Fisiologia. Cap.1: Resumen de principios fisicos y: quimicos. Interamericana. 1979.
12. Jensen, D. The principles of Physiology, Second edition, Appleton - Century - Cropts, USA, 1980.
13. Kane J. y M. Sternheim. Fisica. Reverté. España. 1982.
14. Kline, J. (ed). Biological foundations of biomedical engineering. Little, Brown and company. USA. 1976.
15. Lehninger, A. L. Bioquimica. Las bases moleculares de la estructura y la función celular. Omega. Barcelona. 1978.
16. Montoreano, R. Manual de Fisiologia y Biofisica para estudiantes de Medicina. Tomo 1. 2ªª edición. Universidad de Carabobo. 1995.
17. Matsen, F. A., Myers, J., Hackerman, N. Pre-medical Physical Chemistry. Tercera edición. Macmillan. New York. 1960.
18. Selkurt, E. E. Fisiologia. Quinta edición. Argentina. 1985.
19. Smith, K. Liquidos y electrolitos. Un enfoque accesible. El Manual Moderno. México. 1982.
20. Strother, G. K. Fisica aplicada a las ciencias de la salud. McGraw-Hill. 1977.
21. Vick, R. Fisiologia Médica Contemporánea. Cap. 1: Principios fisiológicos. McGraw-Hill. 1987.
22. Volhkenstein, M. V., Biofisica. Cap. 1: Cuestiones y metodos de la Biofisica. Mir. Moscú. 1985.
23. West, J. B. Fisiologia Respiratoria. Apéndice: pág. 144. 3ra edición. Panamericana Argntina. 1987.

OTRAS REFERENCIAS

24. Barreto, K.E., Barman, S.M., Boitano, S., Brooks, H.L. Fisiologia Médica de GANONG. 24avaedición. McGraw-Hill/Lange. 2013.
25. Bushong, S. Manual de Radiologia para Técnicos. Novena edición. Elsevier/Mosby. Barcelona (España). 2010.
26. Coterril, R. Biophysics. An Introduction. Wiley. Great Britain. 2005.
27. Cussó, F., López, C., Villar, R. Fisica de los Procesos Biológicos. Ariel. España. 2004.
28. González Ibeas, J. Introducción a la Fisica y Biofisica. Alhambra. España. 1975.
29. Hughes, W. Aspects of Biophysics. John Wiley & Sons. USA. 1979.
30. Koeppen, B., Stanton, B. Fisiologia de BERNE y LEVY. 6ta edición. Elsevier. 2009.
31. Nelson, DL., Cox, MM. Principios de Bioquimica de Lehninger. Cuarta edición. Omega. 2005.
32. Parisi, M. Temas de Biofisica. McGraw-Hill. Chile. 2001.
33. Waigh, T. Aplied Biophysics. Wiley. Great Britain. 2007.
34. Yushimito R, L. Biofisica. El Manual Moderno. Colombia. 2007.

Apéndice I

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ALGUNAS SOLUCIONES EMPLEADAS COMO SUSTITUTIVAS DEL AGUA Y ELECTROLITOS. Ref. [16]

Solución (mEq/l)	*Na*	*K*	*Ca*	*Mg*	*Cl*	*Iones L-B*	*Os total*
F	162,5				162,5		325
ILCL	160,3				108,3	52,0	321
GCLNa	54,1				54,1		302
RBT	156,4	4,0	2,3		160,3	2,4	324
RH	129,8	5,4	1,8	2,0	11,8	27,2	276

F: Fisiológica.
ILCL: Isotónica de lactato sódico-cloruro sódico.
GCLNa: Glucosa-cloruro de sodio.
RBT: Ringer según Best y Taylor.
RH: Ringer según Hartmann.
Os total: Osmolaridad total.
IL-B: Iones lactato-bicarbonato.

SOLUCIONES COMERCIALES. Ref. [16]

Sol (mg)	*D*	*NaCl*	*A-Na*	*G-Na*	*KCl*	*$MgCl_2$*	*$CaCl_2$*	*L-Na*	*Agua c.s.p*
N-RD	5000	526	222	502	37	14			100ml
RI		0,60			0,03		0,033		100ml
RL		0,60			0,03		0,02	0,31	100ml

D: Dextrosa
RI: Ringer inyectable (endovenoso).
RL: Ringer lactato.
NaCl: Cloruro de sodio.
A-Na: Acetato de sodio.
G-Na: Gluconato de sodio.
KCl: Cloruro de potasio.
$MgCl_2$: Cloruro de magnesio.
$CaCl_2$: Cloruro de calcio.
L-Na: Lactato de sodio.
N-RD: Normosol-R con Dextrosa.
C.s.p: Cantidad suficiente para ...

TABLA RESUMEN DE LAS UNIDADES DE CONCENTRACIÓN

UNIDAD DE CONCENTRACIÓN	DEFINICIÓN
P / V	Representa la masa de un soluto en un cierto volumen de solución o de solvente. C = mg %, g %
P / P	Representa la masa de un soluto en una cierta masa de solución o de solvente. C = % P / P
V / V	Representa el volumen de un soluto en un cierto volumen de solución o de solvente. C= % V / V
MOLARIDAD	Número de moles de soluto entre el volumen de la solución expresado en litros. M = n / V (l)
MOLALIDAD	Número de moles de soluto dividido entre la masa del solvente expresada en kilogramos. m = n / masa de solvente (Kg)
NORMALIDAD	Número de equivalentes entre el volumen de la solución en litros. N = n* / volumen de solución (l)
OSMOLARIDAD	Es el número total de moles de partículas independientes entre el volumen de la solución expresado en litros. Osmolaridad = $n_{\text{totales de p.i}}$ / volumen de solución (l)
OSMOLALIDAD	Es el número total de moles de partículas independientes entre la masa de solvente expresada en kilogramos. Osmolalidad = $n_{\text{totales de p.i}}$ / masa de solvente (Kg)

Apéndice II

CONDICIONES FÍSICAS PARA LOS GASES

1. Condiciones pulmonares: Se denominan condiciones BTPS (body temperature and pressure saturated with water vapor, en inglés). Esto significa que el volumen de un determinado gas debe expresarse a la temperatura del cuerpo, a presión ambiental y saturado de vapor de agua. Estas son las condiciones que existen en los pulmones humanos (t = 37°C, presión barométrica del lugar y presión de vapor de agua a 37°C igual a 47 mmHg)

2. Condiciones ambientales: Se denominan condiciones ATPS (ambient temperature and pressure, saturated with water vapor, en inglés). Para conocer el volumen de un gas en las condiciones pulmonares se debe efectuar una corrección al volumen expresado en condiciones ambientales (las que presenta el gas recolectado en un espirómetro), debido a que el volumen de un gas es función de la temperatura y la presión (Ley de Clapeyron). Esta corrección se expresa a través de un factor que se ha determinado para una presión barométrica de 760 mmHg (cuadro 1). La expresión para corregir el volumen es:

$$VBTPS = VATPS \times [(273 + 37) / (273 + tA)] \times [(P_B - P_{H2O}) / (P_B - 47)]$$

$$= VATPS \times \text{Factor de corrección}$$

donde tA = temperatura ambiente en °C

P_B = presión barométrica en mmHg

P_{H2O} = presión de vapor de agua a T_A

CUADRO I

COEFICIENTES DECONVERSIÓN DE LOS VOLÚMENES ATPS EN VOLÚMENES BTPS

Temperatura (°C)	*Factor de corrección*
15	1,128
16	1,123
17	1,118
18	1,112
19	1,107
20	1,102
21	1,096
22	1,091
23	1,085
24	1,080
25	1,075
26	1,068
27	1,063
28	1,057
29	1,051
30	1,045
31	1,039
32	1,032
33	1,026
34	1,020
35	1,014
36	1,007
37	1,000
38	0,993

47 mm Hg = presión saturada de vapor de agua a 37°C

3. Condiciones standard: Se denominan condiciones STPD (standard temperature and pressure, dry, en inglés). Esto significa que el volumen de un determinado gas debe expresarse a una temperatura de 0°C, 760 mmHg y gas deshidratado. En muchas situaciones fisiológicas es importante conocer el número de moles (o moléculas) de un determinado gas. De acuerdo con la ley de Avogadro, un mol de cualquier gas en condiciones STPD ocupa un volumen de 22,4 lts. Esto significa que el volumen del gas en STPD dividido entre 22,4 lts es igual al número de moles.

Para convertir un volumen ATPS en un volumen STPD, se debe utilizar un factor de corrección (cuadro 2) el cual se determina para una presión barométrica y una temperatura determinadas. La expresión para corregir el volumen es:

$$VSTPD = VATPS \times [273 / (273 + tA)] \times [(P_B - P_{H2O}) / 760]$$

$$= VATPS \times \text{factor de corrección}$$

4. Condiciones ambientales con aire seco: Se denominan condiciones ATPD (ambient temperaature and pressure, dry, en inglés). Esto significa que el volumen del gas en estas condiciones debe determinarse a la

temperatura y presión ambiental y deshidratado. Para convertir un volumen en condiciones ATPS a condiciones ATPD debemos utilizar la siguiente fórmula:

$$VATPD = VATPS \times [P_B / (P_B - 47)]$$

$$= VATPS \times \text{Factor de corrección}$$

CUADRO II

COEFICIENTES DE CONVERSIÓN DE LOS VOLÚMENES ATPS EN VOLÚMENES STPD

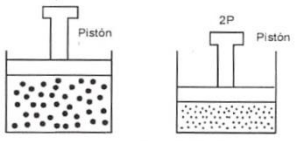
P_R (torr)	Temperatura en ° C							
	15	17	19	21	23	25	27	37
300	0,358	0,354	0,349	0,344	0,338	0,333	0,327	0,293
400	0,483	0,477	0,472	0,466	0,460	0,453	0,447	0,409
500	0,607	0,601	0,597	0,588	0,581	0,574	0,567	0,525
600	0,732	0,725	0,718	0,710	0,703	0,695	0,686	0,641
695	0,851	0,843	0,835	0,826	0,818	0,809	0,800	0,751
700	0,857	0,849	0,841	0,832	0,824	0,815	0,806	0,756
705	0,863	0,855	0,847	0,839	0,830	0,821	0,812	0,762
710	0,870	0,861	0,853	0,845	0,836	0,827	0,818	0,768
715	0,876	0,868	0,859	0,851	0,841	0,833	0,824	0,774
720	0,882	0,874	0,865	0,857	0,848	0,839	0,830	0,780
725	0,888	0,880	0,872	0,863	0,854	0,845	0,836	0,785
730	0,895	0,886	0,878	0,869	0,860	0,851	0,842	0,791
735	0,901	0,892	0,884	0,875	0,866	0,857	0,848	0,797
740	0,907	0,899	0,890	0,881	0,872	0,863	0,854	0,803
745	0,913	0,905	0,895	0,887	0,878	0,869	0,860	0,809
750	0,919	0,911	0,902	0,893	0,885	0,875	0,866	0,814
755	0,926	0,917	0,908	0,900	0,891	0,881	0,872	0,820
760	0,932	0,923	0,915	0,906	0,899	0,887	0,878	0,826
765	0,938	0,930	0,921	0,912	0,903	0,893	0,884	0,832
770	0,944	0,936	0,927	0,918	0,909	0,899	0,890	0,838
775	0,951	0,942	0,933	0,924	0,913	0,905	0,896	0,843

TABLA RESUMEN DE LAS LEYES DE LOS GASES

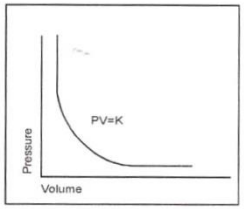
LEY	CONDICIÓN
Boyle-Mariotte	A temperatura y número de moles constante la presión y el volumen de un gas son inversamente proporcionales. pV = constante.
Charles-Gay-Lusac	A presión constante y número de moles constantes el volumen y la temperatura son directamente proporcionales. T/V = constante.
Gay-Lussac	A volumen y número de moles constante la presión y la temperatura son directamente proporcionales. P/T = constante.
Avogadro	A temperatura, presión y volumen constantes el número de moles también es constante. $N_A = 6{,}023 \times 10^{23}$ partículas.
Dalton	Cada componente de la mezcla gaseosa ejerce una presión como si él solo ocupara todo el volumen del recipiente. $P_{total} = P_1 + P_2 + \ldots + P_n$
Henry	A una temperatura dada y a presiones parciales bajas del gas, la cantidad de éste que se disuelve en un líquido, depende directamente de la presión parcial del gas. $C = sp$
Graham	La velocidad de difusión de un gas a una presión y temperatura dada, es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su peso molecular. $Vd_1/Vd_2 = \sqrt{M_2} / \sqrt{M_1}$

LEYES DE LOS GASES

Equilibrio: Pext = Pint

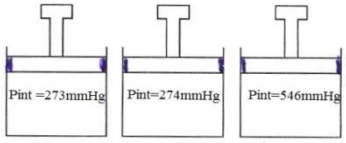


Ley de Boyle

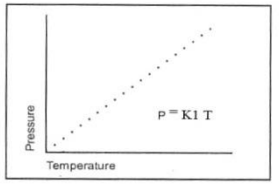


T = Constante

Pint =Pext = constante

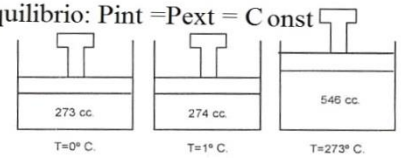


Ley de Gay-Lussac

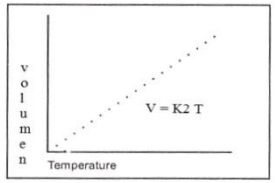


V = Constante

Equilibrio: Pint =Pext = C onst



Ley de Charles



P = Constante

Apéndice III

¿Qué es la Biofísica?

La palabra Biofisica ha sido empleada con muchos significados diferentes. Los temas que estudia a menudo han sido y son incluidos en otras áreas o disciplinas tales como fisiologia, bioquimica, biologia molecular, etc., sin que sea posible afirmar si esto es correcto o no. La causa de esta ambigüedad reside en el hecho de la Biofisica es una ciencia «limite» o de «frontera» e intrinsecamente interdisciplinaria, lo cual hace muy dificil delimitar su campo con exactitud.

Por su parte, la Bioingenieria se puede considerar como la intersección entre dos grandes campos de aplicación como son la medicina y la ingenieria.

Objetivos de la Biofísica:

El objetivo de la Biofisica es el estudio de los aspectos fisicos de los fenómenos biológicos, los cuales a su vez son procesos que ocurren en estructuras biológicas. Asi pues, podemos estudiar los aspectos fisicos de un proceso biológico, por ejemplo:

Transferencia de calor en el cuerpo humano
Potenciales eléctricos de las membranas celulares
Trabajo muscular
Óptica geométrica del ojo
Generación de impulsos eléctricos en el corazón.

O podemos estudiar los aspectos fisicos de la estructura, por ejemplo:

Capacidad calórica de los tejidos
Estructuras de las membranas biológicas y Propiedades Eléctricas
Estructura de las fibras musculares
Estructura del ojo

Propiedades eléctricas de las membranas celulares

Sin embargo, en cualquiera de los casos, a menudo la etapa estructural queda rápidamente superada, para llegar a procesos moleculares de tipo físicos o químicos complejos. A manera de ejemplo, veamos el estudio del proceso neuro-muscular. En este proceso tenemos:

Entrada de información y procesamiento de la señal => Origen del Potencial de Acción => Conducción del Potencial de acción => Depolarización de los terminales nerviosos => Liberación del neurotransmisor => Acoplamiento excitación-contracción => Contracción muscular.

Tenemos así:

Movimiento de iones a través de membranas
Desprendimiento de calor
Cambios moleculares en la membrana
Liberación de sustancias
Procesos subcelulares.

Del ejemplo anterior podemos concluir que la Biofísica encara los estudios físicos y fisicoquímicos de los fenómenos biológicos. De este modo, la Biofísica llega a ponerse en contacto con la Bioquímica. Es importante aclarar que a pesar de la importancia de la instrumentación usada en estos estudios, el sólo hecho de emplear recursos físicos en una investigación biológica no hace que ésta sea de naturaleza biofísica. Si así fuera, la histología por ejemplo sería biofísica, ya que en ella se emplean instrumentos físicos como es el microscopio. Este tipo de técnicas se podrían denominar «recursos biofísicos de la investigación».

Métodos de la Biofísica:

Lo que quizá diferencia más a la Biofísica de otras ramas de la Biología es su método, el cual tiene aspectos comunes con la matemática y la física. Como toda ciencia natural, está basada en la observación de los fenómenos y la experimentación. Sobre esta base persigue, al igual que

la física, expresiones matemáticas que representen el fenómeno bajo estudio. Por otra parte, la Biofísica tiene en común con las otras ramas de la biología la gran complejidad de los sistemas que investiga. Aún en los casos relativamente simples, en los cuales se estudia una sola célula, se está trabajando, como veremos más adelante, en una estructura sumamente compleja, donde ocurren numerosos fenómenos simultáneamente, los cuales, a su vez, pueden ser modificados por otro sin número de factores.

En forma esquemática, podemos decir que los estudios biofísicos se realizan a tres niveles:

a) Nivel macroscópico: en el cual se pueden considerar procesos tales como la circulación de la sangre, la ventilación pulmonar, etc.
b) Nivel celular: en el cual se incluyen fenómenos tales como el transporte a través de membranas, fenómenos eléctricos en células excitables, contracción muscular, etc.
c) Nivel molecular: a este nivel se llega cuando se profundiza en el estudio de los fenómenos mencionados anteriormente. A este nivel se estudian las interacciones entre los diferentes tipos de moléculas, entrando así en las áreas de bioquímica y biología molecular.

Por lo visto anteriormente, podemos concluir, que dar una definición de Biofísica es bastante difícil, por no decir imposible. Sin embargo, esto no es lo realmente importante, lo importante es el conocimiento del fenómeno biológico hasta sus últimos detalles y la biofísica provee una metodología que contribuye a lograr este conocimiento.

Así pues, partiendo de que la Biofísica es una ciencia interdisciplinaria por excelencia, muchas veces se plantea el interrogante de cuales tópicos o temas corresponden al área de la Biofísica y cuales no. Partiendo, como mencionamos anteriormente, del concepto de que la Biofísica se ocupa del estudio de los aspectos físicos de los procesos biológicos, entonces podemos concluir que la Biofísica se encarga del estudio de los aspectos físicos de las estructuras biológicas y de sus funciones. Sus métodos de estudio y de investigación, provienen primordialmente de técnicas experimentales y métodos teóricos de la Física. Por lo tanto, por su metodología la Biofísica está muy relacionada con las Ciencias

Físicas. Sin embargo, por la naturaleza de los temas bajo su estudio, la Biofísica se ubica como parte de las Ciencias Biológicas.

ÁREAS DE INVESTIGACIÓN DE LA BIOFÍSICA Y LA BIOINGENIERÍA

Antecedentes

El origen de la Biofísica antecede a las divisiones de las ciencias naturales en disciplinas separadas. Fenómenos como la producción de corrientes eléctricas (bioelectricidad) y la producción de luz (bioluminiscencia) por animales, fueron objeto de estudio por los antiguos egipcios.

Más adelante en la historia, la relación entre la electricidad y la biología fue tema de especulaciones en el siglo XVII; que luego se transformó en sujeto de extensas investigaciones durante los siglos XVIII y XIX. Recordarán, la famosa controversia entre Galvani, quien defendía la existencia de la electricidad animal y Volta quien la negaba. Esta confrontación dio origen con el tiempo al estudio de la electricidad y a la electrónica por una parte, y a la electrofisiología por la otra. Las investigaciones sobre nervios y músculos dio origen a la neurofisiología y estableció a la Biofísica como una ciencia. También los estudios de la difusión y la ósmosis, dos fuerzas responsables del flujo pasivo de materia en los organismos vivos, fueron objeto de estudios en los inicios de la Biofísica. Estas leyes fueron enunciadas por Adolfo Fick, quien el año 1856 publicó el primer tratado de Biofísica (Medical Physics). Por otra parte, las investigaciones de la física y la química de soluciones dio origen a la fisicoquímica. Más tarde se iniciaron estudios, también dentro del campo de la Biofísica y mediante el uso de la difracción de rayos X, que dieron como fruto el conocimiento de las estructuras moleculares de la hemoglobina y el DNA.

Situación actual

Haciendo un intento para sistematizar el estudio de la Biofísica, y partiendo de los conceptos anteriores, podemos clasificar los posibles tópicos de su estudio en cinco grupos:

1. Física Biológica o Física Médica que cubren el estudio de técnicas o métodos teóricos de la Física relevantes en la investigación de los fenómenos biológicos: mecánica, electricidad, ondas, luz, termodinámica, bioenergética, etc.
2. Tópicos relacionados con métodos físicos que permiten el estudio de las estructuras biológicas tanto a nivel molecular, como al nivel celular u organístico tales como estructura de organelos, estructura de biomoléculas (proteínas, DNA, hemoglobina, clorofila, enzimas). Ejemplo de tales métodos son: microscopía electrónica, rayos X, resonancia magnética nuclear (NMR), espectroscopía, etc.
3. Métodos o técnicas que permiten el estudio del funcionamiento de las estructuras biológicas, también desde el nivel molecular, hasta el nivel organístico: electrónica, fluídica, transductores, isótopos, etc.
4. Procesos biológicos en los cuales, los avances de la investigación han permitido establecer una relación entre la estructura biológica y su funcionamiento; tales como: conducción nerviosa (Hodgkin y Huxley), contracción muscular (Huxley y A.V. Hill), visión, audición, hemodinamia, electrocardiogénesis, etc.
5. Estudios de los efectos de agentes físicos externos sobre el proceso biológico; su estructura y funcionamiento. Ejemplo, el efecto y uso de las radiaciones ionizantes y no ionizantes.

LA BIOFÍSICA Y LA BIOINGENIERÍA

De la unión entre la Biología y la Física nace la Biofísica ó Física de la Vida, en la que se emplean los métodos y principios fundamentales de la Física al análisis de la estructura y funciones de los seres vivos.

Como toda ciencia natural, la Biofísica está basada en la observación de los fenómenos y la experimentación. Sobre esta base persigue, al igual que la Física, expresiones matemáticas que representen el fenómeno bajo estudio. Por otra parte, la Biofísica tiene en común con las otras ramas de la Biología la gran complejidad de los sistemas que investiga. Aún en los casos relativamente simples, en los cuales se estudia una sola célula, se está trabajando con una estructura sumamente compleja, donde

Por su parte, la Bioingeniería se puede considerar como la intersección entre dos grandes campos de aplicación como son la Biología y la Ingeniería (ver Figura 1). En la Bioingeniería los conocimientos de Ingeniería (en todas sus especialidades) se aplican al estudio de los sistemas vivos. Es decir, la Bioingeniería se encarga de las aplicaciones prácticas de los resultados obtenidos por la Biofísica.

Una de las definiciones más aceptadas de Bioingeniería es aquella propuesta en 1972 por el «Committes of the Engineer's Joint Council»

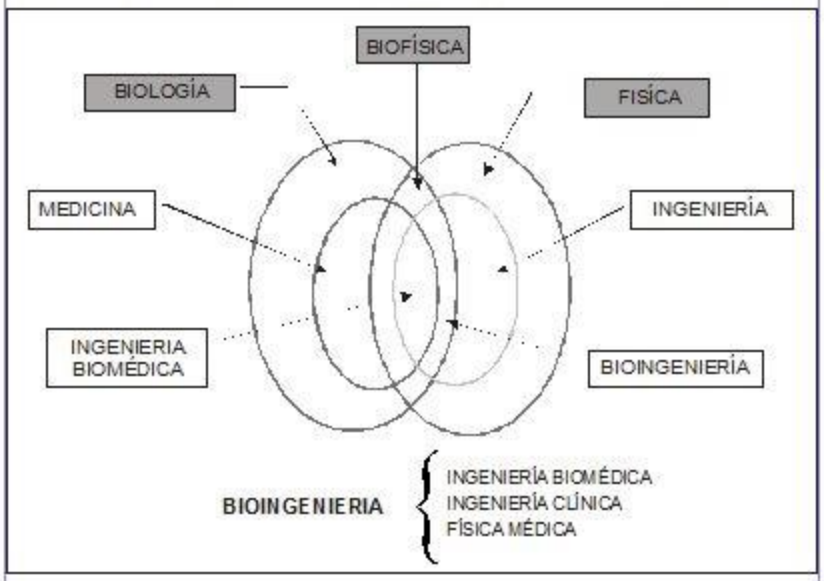


Fig 1: Biofísica y Bioingeniería.

de los Estados Unidos: «La Bioingeniería es la aplicación de los conocimientos recabados de un fértil cruce entre la ciencia ingenieril y la médica, tal que, a través de ambas pueden ser plenamente utilizados para el beneficio del hombre». Esta definición implica una colaboración que normalmente no puede obtenerse dentro de la estructura de cada disciplina por separado.

La Bioingeniería se divide en:

1. Ingeniería Biomédica: es una subárea de la Bioingeniería que tiene como objetivo la aplicación de los principios y técnicas de la ingeniería para desarrollar dispositivos para ser usados en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades. También incluye el desarrollo y utilización de materiales para proveer la restitución o sustitución de funciones y estructuras dañadas y técnicas de procesamiento de señales e imágenes para investigación clínica. Incorpora también el modelaje y simulación de sistemas fisiológicos.

2. Ingeniería Clínica: se puede definir como la aplicación de los conocimientos de ingeniería y gerencia en el área de la salud, especialmente destinados a lograr una mejor atención al paciente. Tiene como objetivos principales el estudio e implementación de métodos para la gerencia, el control y el mantenimiento de las tecnologías de la cual disponen los centros de atención médica, ofreciendo mayor seguridad y mejor utilización de las mismas.

3. Física Médica: se puede considerar como una subárea de la Bioingeniería que tiene diversas funciones: la seguridad radiológica, la garantía de la calidad de la operación de los equipos de radiodiagnóstico y radioterapia y la planificación mediante técnicas físico-computacionales de las diversas técnicas utilizadas en radioterapia.

Apéndice IV

Los seres vivos oomo sistemas materiales y la vida como producto de procesos físicos y químicos de la Tierra.

El objeto fundamental de la Biofísica y por ende de la Bioingeniería son los seres vivos o sistemas biológicos. La unidad fundamental de todo sistema biológico, como es de suponer, es la célula, la cual, dentro de ciertas limitaciones la podemos denominar el "quantum de vida". Esta compleja estructura que es la célula, está compuesta de moléculas inanimadas o sin vida, y que por tanto obedecen todas las leyes de la física y la química. Sin embargo, los organismos vivientes poseen extraordinarios atributos que no los poseen colecciones de materia inanimada o lo que Lehninger denomina "lógica molecular del estado vivo". Asi podríamos hablar de un cuarto estado de la materia que Girard denomina el "estado vivo". Por tanto, en orden decreciente de entropia (desorden) podemos ordenar la materia en: estado gaseoso, estado líquido, estado sólido y "estado vivo".

La materia en su evolución hacia la vida pasa por una serie de etapas de cada vez mayor jerarquía y complejidad:

Organismos
↕
Órganos
↕
Tejidos
↕
Célula
↕
Organelos
↕
Macromoléculas
↕
Átomos y moléculas
↕
Particulas elementales

Según Chapra (la trama de la vida, 1998) el concepto de red(*) provee una nueva perspectiva sobre las denominadas jerarquías de la naturaleza. En esta obra (p.48), Chapra afirma que:

> Algo que los primeros pensadores sistémicos admitieron muy claramente fue la existencia de diferentes niveles de complejidad con diferentes leyes operando en cada nivel. En efecto, el concepto de complejidad organizada se convirtió en el protagonista del planteamiento sistémico. A cada nivel de complejidad los fenómenos observados evidencian propiedades que no se dan en el nivel inferior. Por ejemplo, el concepto de temperatura, crucial en termodinámica, carece de sentido al nivel de átomos individuales, donde reinan las leyes de la teoría cuántica. Del mismo modo, el sabor del azúcar no está presente en los átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno que la constituyen. A principios de los años 1920, el filósofo C.D. Broad acuñó el término propiedades emergentes para estas propiedades que surgen a un cierto nivel de complejidad pero que no se dan en niveles inferiores.

Características de la materia viviente

Como mencionamos anteriormente, la materia viviente posee extraordinarios atributos que lo son característicos:

a) Complejidad molecular y organización: Una de las principales características de la materia viviente es su complejidad y organización. Las células poseen intrincadas estructuras internas, compuesta a su vez de muchas clases de moléculas; en comparación, la materia inanimada consiste de mezclas de compuestos químicos relativamente simples, con poca organización estructural (rocas, cristales, suelos, agua, atmósfera, etc.).

b) Función específica: Cada componente de una estructura biológica tiene una función específica. Esto es así no sólo para los órganos de un organismo, sino también para los organelos de una "simple" célula y más aún para cada compuesto químico individual tales como lípidos, proteínas, ácido nucléico, etc.

(*) Por ejemplo, una sociedad puede verse como una red de individuos (colocados en los nodos o puntos de intersección de la red) interrelacionados. Si amplificamos un nodo de la red (es decir, un individuo) obtendremos otra red conformada por los diversos tejidos y órganos), estos ocupan los nodos de la nueva red y están interrelacionados entre sí.

c) Capacidad de extraer materia y energía del ambiente (metabolismo): Una característica fundamental de los organismos vivos es su capacidad de extraer y transformar materia y energía de su ambiente, esta materia y energía es usada para construir y mantener su propia e intrincada estructura a partir de materiales relativamente simples y realizar todas la funciones que le son características. Por el contrario, la materia inanimada no tiene esta capacidad de utilizar energía externa para mantener su propia organización estructural; mas bien, las estructuras inanimadas usualmente decaen a estados más desorganizados cuando absorben energía del ambiente.

d) Capacidad de auto-replicación (reproducción): La característica más extraordinaria de los organismos vivos es su capacidad de precisa auto-replicación o reproducción utilizando para ello la información genética contenida dentro del mismo sistema y almacenada en la molécula de ADN heredada de su predecesor.

e) Irritabilidad: la célula u organismo es capaz de responder a los cambios del ambiente, para lo cual cuenta con sensibles receptores que le suministran información sobre dichos cambios.

f) Adaptabilidad: la célula u organismo, dentro de ciertos rangos, es capaz de adaptarse a cambios físicos y químicos del medio.

Cabría preguntarnos entonces: ¿Si los organismos vivos están formados por moléculas que son intrínsecamente inanimadas, porqué la materia viviente difiere tan radicalmente de la materia inanimada la cual consiste también de moléculas inanimadas? Es decir, ¿porqué la materia viva es más que la suma de las partes que la constituyen? Al respecto, en la historia han surgido teorías como la "Teoría Vitalista", la cual explica tal fenómeno asumiendo que los organismos vivos están dotados de una "fuerza divina y misteriosa". Esta doctrina ha sido descartada por la ciencia moderna. Precisamente una de las metas fundamentales de ciencias como la Biofísica y la Bioquímica es determinar o explicar como colecciones de materia inanimada que constituyen los seres vivientes interactúan entre si para mantener y perpetuar el "estado viviente". En este "estado", las moléculas que conforman los organismos vivos, no sólo obedecen todas las leyes de la física y la química que gobiernan el comportamiento de la materia inanimada, sino que en adición, interactúan

entre ellas de acuerdo a otro conjunto de principios que, como dijimos antes, Lehninger denomina colectivamente "la lógica molecular del estado vivo". Estos principios no necesariamente consisten de nuevas o aún no descubiertas leyes físicas, si no que más bien deben ser consideradas como un conjunto de reglas básicas que gobiernan la naturaleza, función o interacción de los tipos específicos de moléculas encontradas en el "estado vivo"; la cual provee a dichas moléculas la capacidad de "auto-organización" y "auto-replicación". No todos estos principios que constituyen "la lógica molecular" han sido identificados, y de acuerdo a Lehninger, es preferible hablar de esos principios como axiomas o hipótesis, algunos de ellos solo intuitivos y aún no probados.

En nuestros estudios discutiremos temas que caen en el campo de la metafísica y de la teología y cada quien, de acuerdo a sus creencias religiosas, tendrá que responder a sus propias inquietudes.

Teorías sobre el origen de la vida

De acuerdo a la teoría del "big bang", hace diez billones de años, mediante una enorme explosión fue creado nuestro universo. Inmensas nubes de polvo y gases originadas por esta explosión formaron la galaxias primitivas posiblemente por condensación de este material interestelar. Podemos pensar que este material consistía fundamentalmente de partículas elementales, neutrones, protones y electrones, además de otros tipos de corpúsculos y radiaciones. Estas partículas elementales se deben haber condensado formando los diferentes tipos de átomos dando lugar a la formación de los cuerpos celestes, entre ellos nuestro sistema solar.

Si analizamos la Tabla Periódica, podemos observar que existen 112 elementos, de los cuales 22 se encuentran en los organismos vivos, siendo sin embargo sólo 6 fundamentales para su existencia: hidrógeno, carbono, nitrógeno, oxigeno, fósforo y azufre.

Sin entrar en los aspectos filosóficos de la cuestión, podemos asumir que la vida surge de procesos físicos y químicos de la misma tierra, cuando hace aproximadamente 2 a 3 billones de años las condiciones físicas y químicas imperantes permitieron la formación de las primeras moléculas, que hoy en día denominamos biomoléculas.

Así pues, podemos decir, que la historia comenzó con seis elementos de la tabla periódica (Primer nivel de complejidad):

$$H_1 \quad C_6 \quad N_7 \quad O_8 \quad P_{15} \quad S_{16}$$

Estos elementos se combinaron para formar una atmósfera primitiva compuesta probablemente de (Segundo nivel de complejidad):

H_2	H_2O	NH_3	CH_4	NCH
Hidrógeno gaseoso	Agua	Amoniaco	Metano	Cianidas

Esta atmósfera, carente de oxigeno, se condensó en parte y produjo precipitaciones que duraron posiblemente cientos de años dando origen a un océano denominado "sopa orgánica", compuesta por los elementos antes mencionados, más minerales, sales y otros compuestos inorgánicos.

Estos compuestos bajo condiciones favorables de temperatura, energía, composición, y sobre todo mucho tiempo pudieron haber reaccionado dando lugar a la formación de moléculas más complejas, tales como aminoácidos, purinas, pirimidinas, etc. (Experimento de Miller-Urey).

A su vez, estas moléculas simples se combinaron para formar moléculas aún más complejas. Con el tiempo combinaciones de estas moléculas dieron origen a eficientes transportadores de energía química (tal como el ATP y el fosfato de creatina) que permitieron otras reacciones químicas aún más complejas.

$$ATP \Rightarrow ADP + Pi + E$$

Las reacciones de polimerización dieron origen al tercer nivel de complejidad molecular, dando lugar a moléculas poliméricas, es decir compuestas por unidades que se repiten denominadas monómeros. Dando lugar a las proteínas, los carbohidratos, los lípidos y los ácidos nucleicos.

Una vez llegado a este nivel de complejidad, estamos más cerca de la hora cero en la cual la vida comienza. La pregunta a partir de este nivel de complejidad es: ¿Cuál fue el camino que tomó la naturaleza para dar origen a la vida? Esto está relacionado con el cuarto nivel de complejidad.

a) Mediante la síntesis gradual de moléculas cada vez más complejas, hasta llegar a una que posea la característica primordial de la vida

como es la auto-replicación. Como sabemos el DNA tiene esa característica y a su vez es responsable de la síntesis de las proteínas, entre las cuales se encuentran la enzimas. Esta primera molécula debe haber surgido "espontáneamente" mediante la síntesis de los precursores existentes, tales como glucosa, ácido fosfórico, purina y pirimidina. Una vez formada, se autoreplicó y daría origen a la síntesis de otras moléculas diferentes como las proteínas, originándose así un sistema que se reproduce y que con el tiempo y por evolución y mutaciones daría origen a todos los seres vivos de la Tierra.

b) Otro mecanismo posible es la agregación de diferentes macromoléculas, tal cual lo propone Oparin y más tarde Sidney Fox.

Sin embargo, cualquiera de los mecanismos seleccionados por la naturaleza debe haber dado origen a sistemas más complejos que luego se rodearon de una membrana que permitió la diferenciación dando origen a la célula primitiva.

Así pues, estamos ante la presencia de un sistema termodinámico en el cual ocurren procesos que en su conjunto denominaremos VIDA. Así, desde un punto de vista fenomenológico la vida es un conjunto de transformaciones energéticas que ocurren en los seres vivos y que obedecen todas las leyes de la física y la química, además de otras leyes, que denominamos, en su conjunto, metabolismo.

Este proceso de creciente complejidad y organización, dio origen a la formación de moléculas cada vez más complejas y a la formación de estructuras internas aún más ordenadas, y requiere necesariamente de un continuo flujo de energía y materia, además de un elemento extra como es la información para poder replicarse.

Referencias

1. **Audesirk, T., Audesirk, G. Life on Earth. Prentice-Hall. USA. 1997.**
2. **Baker, J.; Allen, C.: Materia, energía y vida, FEI, México, 1972.**
3. Bresch, C.: La vida, un estado intermedio, Salvat, España, 1987.
4. Biology an apreciation of life. CRM Books.
5. Capra, F.: La trama de la vida (una nueva perspectiva de los sistemas vivos) Anagrama, España, 1998.
6. De Chardin, Teilhard: El fenómeno humano, Orbis, España, 1984.
7. Hawking, S.: Historia del Tiempo. Del Big Bang a los agujeros negros, RBA, España, 1993.
8. Lehninger, A.: Bioenergética. FEI. EUA. 1975.
9. Lehninger, A. Bioquímica: Las Bases Moleculares de la estructura y función celular. Omega. España. 1978.
10. Weinberg, S.: The first three minutes. Basic books, EUA, 1988.
11. Where does live begin? Medical and Health Encyclopedia, Volumen II.
12. ¿Existe un creador que se interese por nosotros? Watch tower bible and tract society of Pennsylvania, EUA, 1998.

Apéndice V

Termodinámica biológica

El flujo de energía a través de la biósfera:

Tanto los sistemas vivos como los inanimados, forma parte en un Universo que obedece ciertas leyes fundamentales. Estas leyes gobiernan tanto la materia como la energia. La materia y la energia pueden tomar diferentes formas e intercambiarse unas en otras. Este concepto se expresa matemáticamente mediante la Primera Ley de la Termodinámica, la cual gobierna el flujo de energia y el ciclo de la materia. Por otra parte, la dirección de los procesos lo determina la Segunda Ley de la Termodinámica. Es en este contexto donde los sistemas vivos se desenvuelven.

Ciclo de la materia:

Cada átomo o molécula incorporado a un sistema viviente forma parte de algún ciclo de la naturaleza. A menudo estos ciclos son interrumpidos por la mano del hombre. Ejemplo de ello es cuando un cadáver es enterrado en una caja de hierro y concreto, interrumpiendo asi el proceso mediante el cual los átomos y molécula de ese cadáver pasaran a formar parte del suelo. En un contexto más amplio, los ecólogos se preocupan cada dia mas por los cambios producidos por la tecnologia en la Tierra, los cuales pueden alterar uno o más ciclos y cortar asi las fuentes de algunos tipos de átomos necesarios para todos los seres vivos. Asi, nosotros mismos somos parte de esquemas de reciclaje de átomos en los cuales estamos incluidos todos los seres vivos y los sistemas no vivientes. Cada átomo de nuestro cuerpo ha ocupado alguna vez en el pasado un lugar en cientos y cientos de otros sistemas vivos e inertes.

Flujo de energía:

Cuando una sustancia como la gasolina es quemada en el motor de un automóvil, parte de la energía química almacenada en la estructura química de la gasolina es convertida en calor, y otra parte es convertida en otras formas de energía, tales como energía mecánica o energía de movimiento, la cual es en definitiva la utilizada para desplazar el automóvil. En otras palabras, la energía química puede ser convertida en energía mecánica; sin embargo, siempre parte de esta energía es perdida en el proceso de conversión. Tanto los sistemas vivientes como los no vivientes son capaces de convertir directamente energía química en otras formas de energía, tales como: energía eléctrica, en nervios y circuitos eléctricos, en energía mecánica, en maquinarias y músculos, en energía luminosa, en lámparas y algunos insectos, pero siempre en todos estos procesos parte de la energía es perdida en forma de calor.

Los organismos vivientes constituyen sistemas termodinámicos denominados «sistemas abiertos». Estos sistemas se caracterizan por ser «abiertos» al ambiente que los rodea, permitiendo tanto el flujo de energía como de materia: los alimentos son ingeridos por los organismos vivos y los productos de desecho son expulsados del organismo. Los organismos vivos permanecen en «estados estables o estacionarios» pertenecientes a un equilibrio dinámico. Aún los huesos de un vertebrado cambian minuto a minuto. Un átomo de calcio que deja el hueso en un momento determinado, entra al torrente sanguíneo, pero es reemplazado por otro exactamente igual, de forma tal que el hueso luce idéntico minuto a minuto.

La evolución de los sistemas termodinámicos se describe por la Segunda Ley de la Termodinámica. Esta ley, cuando se interpreta su significado, pone de manifiesto que siempre que la energía es convertida de una forma a otra, parte de esta energía es convertida en energía térmica (calor) la cual no puede ser utilizada por otros procesos y es perdida en el ambiente. Dicho de otra forma, esto implica que la entropía del universo siempre se incrementa cuando ocurre un proceso termodinámico. Entropía no es un concepto fácil de definir, como veremos se requieren de conceptos físicos y matemáticos. Sin embargo, usando una terminología relativamente simple, la entropía es a menudo descrita como «desorden», «no predictabilidad», «energía no utilizable», «caos», etc. Un estado de alta

entropía es a menudo descrito como uno que puede ser mantenido con poca energía o sin energía y materia. Por ejemplo, en los sistemas vivientes, la muerte representa el estado de máxima entropía, ya que una vez muerto, el sistema no requiere de energía ni materia para permanecer muerto. Los sistemas vivos se caracterizan por ser altamente complejos, organizados y ordenados, por tanto ellos se encuentran en estados de relativamente baja entropía. Requiriendo un continuo consumo de energía y materia para permanecer vivos.

La entropía puede considerarse en una forma amplia como el desorden o el caos de un sistema. Cualquier sistema vivo al cual no se le suple energía tiende hacia un estado de máxima entropía, en otras palabras, el orden del sistema se pierde continuamente y su estructura tiende a desorganizarse paulatinamente, y cada vez menor cantidad de energía útil es disponible para realizar trabajo. Aún en los sistemas cerrados, los cuales ni pierden ni ganan energía del ambiente, la cantidad de energía útil del sistema paulatinamente decrece aunque la cantidad total de energía permanece constante.

Todo sistema que no es capaz de absorber energía del ambiente, siempre evoluciona a estados de mayor entropía. La energía que posee se perderá, dando lugar a un mayor desorden y su habilidad de realizar trabajo declina progresivamente. Una piedra es un sistema termodinámico, como lo es un árbol o un hombre. Para los últimos, los estados de alta entropía ocurren cuando mueren, mientras los estados de baja entropía ocurren durante la vida química de ambos.

Si consideramos «el sistema» como todos los organismos vivientes, entonces la biósfera se puede considerar como un sistema termodinámico. Ya que este sistema está constituido por macromoléculas altamente organizadas, las cuales a su vez constituyen sistemas complejos de células y organismos, la biósfera es así un sistema termodianámico de muy baja entropía y alta energía libre; el cual, para mantenerse en este estado termodinámico requiere de un continuo consumo de energía del ambiente. La única fuente de energía utilizable por la biósfera es proveniente de la energía del sol. Las plantas verdes, a través de un proceso denominado «fotosíntesis», convierten la energía radiante en energía química, la cual puede ser almacenada y transferida de un organismo a otro. En las células de plantas y animales, este tipo de energía química es convertida a otras formas útiles de energía química

mediante un proceso denominado «respiración celular». Parte de esta energía (proveniente, por ejemplo, del ATP) es utilizada para sintetizar macromoléculas y para organizarlas en complejas estructuras que representan el crecimiento y reproducción de los organismos.

Así pues, la energía en el Universo, puede ser considerada como un tránsito de energía útil a entropía.

Aspectos cuantitativos de la Energética

Como vimos el proceso evolutivo hacia la aparición de la vida fue un proceso de creciente complejidad y organización en la formación de moléculas más complejas y ordenadas que requiere de un continuo flujo de energía y materia. Estamos así en presencia de un sistema termodinámico en el cual ocurren procesos que en su conjunto denominamos vida.

El proceso fundamental en el mundo biológico es el mantenimiento de la vida. Así pues, los procesos biológicos son fundamentalmente procesos termodinámicos y por lo tanto su estudio debe comenzar con el estudio de los principios termodinámicos que regulan todos los procesos físicos y químicos.

Por definición, la termodinámica es la rama de la física que trata de la energía y sus transformaciones. Quizá el nombre no sea el más descriptivo, ya que el término se refiere específicamente a fenómenos térmicos. Deberíamos utilizar más bien el término energética.

La proposición básica de la termodinámica es que el curso eventual de todo proceso físico o químico está determinado por la naturaleza del contenido energético del sistema material bajo consideración y del intercambio de energía entre el sistema y su ambiente. Todos estos procesos son regidos por dos leyes fundamentales:la primera y la segunda ley de la termodinámica.

Apéndice VI

Experimentos sobre el origen de la vida

Introducción:

Nadie sabe exactamente cuándo o cómo comenzó la existencia, pero el hallazgo de fósiles, el conocimiento cada vez más profundo de la historia de nuestro planeta y el resultado de numerosos experimentos proporcionan datos que avalan la hipótesis de que las primeras células vivas se originaron a partir de combinaciones espontáneas de las moléculas que formaban parte de los mares primitivos.

Hasta mediados del siglo XVIII se pensaba que los compuestos orgánicos solo podían formarse por la acción de los seres vivos pero la síntesis en el laboratorio de la urea (un compuesto orgánico), contradijo este punto de vista.

El desarrollo de la Bioquímica y de la Genética Molecular en las últimas décadas ha permitido conocer con bastante profundidad el funcionamiento químico de las células y la base molecular de sus funciones. Estos conocimientos han servido de base para elaborar un conjunto de hipótesis que intentan explicar cómo la vida puede haberse originado en nuestro Planeta a partir de la materia inerte. Fue el científico ruso Oparin (1922) quien dio una base sólida de la biogénesis (la vida celular fue precedida por un periodo de evolución química). En 1924, A.I. Oparin y, en 1928, el investigador inglés J. S. Haldane crearon las bases teóricas para que, posteriormente en 1952, M. Calvin y, específicamente, en 1953, S. Miller

pudieran experimentar con las hipótesis de los autores inicialmente mencionados. En los años 1960, los investigadores J. Oró, W. Fox y C. Ponnanperuma prosiguieron estos experimentos que demostraban la posibilidad de la síntesis de aminoácidos y otras moléculas complejas dentro de una evolución prebiótica.

- **La teoría de Alexander Oparin**

En 1920, el bioquímico ruso, A. Oparin, planteó la teoría, según la cual, las moléculas orgánicas complejas habrían podido evolucionar fuera de todo organismo, reunirse y formar sistemas cada vez más complejos, sometidos a los principios de la evolución, particularmente el de la selección natural, hasta llegar al primer organelo.

Para Oparin, la atmósfera primitiva estaba compuesta por hidrógeno, metano, amoniaco, y vapor de agua. Esta mezcla gaseosa, debido a la acción de los rayos solares, daría lugar a gran cantidad de moléculas orgánicas, que caerían en los océanos y allí se acumularían durante largos períodos de tiempo sin riesgo de descomposición, formando un "caldo nutritivo". Las moléculas se irían asociando entre sí, formando agregados moleculares cada vez más complejos conformando los "coacervados" con capacidad de autosíntesis (productores de su propio alimento), evolucionarían hacia formas cada vez más estables y complicadas hasta convertirse en estructuras vivientes. Estos organismos primordiales darían lugar, por evolución durante millones de años, al mundo vegetal y animal de nuestro planeta. Teorías semejantes, aunque con menor difusión mundial, fueron expuestas después por el italiano Giglio-Tos y el inglés J.S. Haldane. Planteó que la atmósfera primitiva en la Tierra, cuando todavía no habían aparecido los primeros organismos, carecía de oxígeno libre, pero existían sustancias como el hidrógeno, metano y amoniaco (atmósfera reductora). Estos reaccionaron entre sí debido a la radiación solar, la actividad eléctrica de la atmósfera y a la de los volcanes, dando origen a moléculas de aminoácidos que darían lugar a las primeras células vivas a partir de combinaciones espontáneas de estos aminoácidos que formaban parte de los mares y lagos primitivos.

- **El experimento de Stanley Miller y Harold Urey**

En 1953, Stanley Miller, un estudiante de post-grado llevó a cabo un experimento, bajo la dirección del químico Harold Urey, que pretendía recrear las condiciones de la Tierra poco después de su formación, para así intentar obtener moléculas orgánicas.

Miller construyó un aparato de vidrio constituido esencialmente por un balón, el cual llenó con amoniaco, metano, vapor de agua e hidrógeno (gases que presumiblemente existieron en la atmósfera primitiva). Esta mezcla fue mantenida en permanente estado de ebullición y se hizo circular a través de una solución de agua líquida, sujeta de forma continua a una chispa eléctrica para simular la atmósfera primitiva. Al cabo de una semana encontró que se habían formado aminoácidos simples (glicina y alanina), alfa-amino-n-butírico, entre otros en menor concentración como el ácido alfa-amino-isobutírico, valina, norvalina, isovalina, ácido aspártico, sarcosina (n-metil-glicina), ácido glutámico, prolina, ácido pipecólico, beta-alanina y ácido g-amino-butírico. Como la mayor parte de estos componentes son esenciales para formar las proteínas, carbohidratos y ácidos nucleicos, concluyó de esta manera que bajo condiciones controladas había formado el primer vestigio del origen de la vida.

Como ya mencionamos Miller utilizó un balón donde introdujo los gases que presumiblemente existieron en la atmósfera primitiva (cámara atmosférica). Este balón estaba conectado a través de dos tubos de vidrio, uno a la parte superior y otro a la inferior, de otro balón parcialmente lleno de agua (cámara oceánica) sometido a una fuente de calor y con llaves que permitían tomar muestras del agua. Bajo la cámara oceánica colocó un condensador que permitiría enfriar los gases producidos en la cámara atmosférica. Una vez introducidos el NH_3, H_2O, CH_4 y H_2 al primer balón, produjo descargas eléctricas en esta atmósfera para simular las radiaciones solares que en esa época incidían sobre la superficie de nuestro planeta.

Miller consiguió obtener 4 de los 20 aminoácidos que entran en la composición de las proteínas. Desde entonces, otros investigadores han sometido diversas mezclas de gases simples a multitud de fuentes de energía. Y se ha visto que, bajo condiciones reductoras, los aminoácidos se forman fácilmente: bajo condiciones oxidantes, no se constituyen en absoluto o sólo

en pequeñas cantidades. Como consecuencia de ello, se han multiplicado los experimentos y las hipótesis sobre el origen de la vida.

El procedimiento era el siguiente: se calentaba el agua y se mantenia en ebullición. El vapor de agua y los gases del circuito pasaban por la camara "atmosferica" y recibian una descarga electrica producida por los electrodos los cuales estaban sometidos a un gran potencial eléctrico. Los productos formados en la anterior fase se disolvian en el agua licuada del condensador y pasaban a la cámara "oceánica". Los productos volátiles estaban constantemente destilándose junto con vapor de agua fuera de la cámara "oceánica" hacia la cámara "atmosférica" donde eran sometidos a continuas descargas eléctricas. Los productos no volátiles, se almacenaban en la cámara "oceánica".

Este fue el primer experimento que probó la primera parte de la hipótesis de Oparin y desde entonces, se han hecho cientos de "experimentos de simulación" de las condiciones primitivas que han ido conduciendo bajo supuestos muy diversos a la formación de diversos componentes, presuntos bloques de construcción de los organismos primigenios.

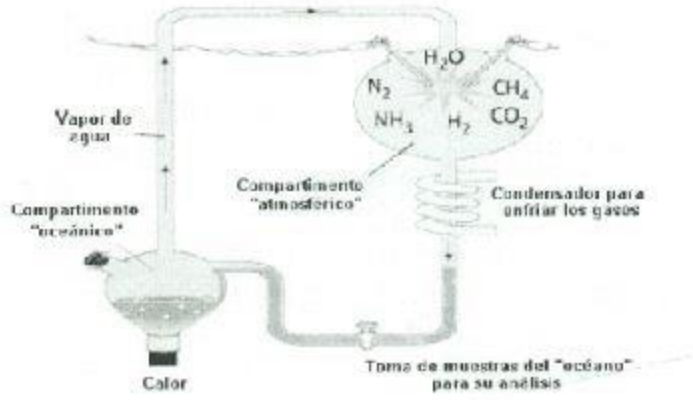


Figura 1. Experimento de Miller-Urey 1953
(Tomado de http://fai.unne.edu.ar/biologia/introduccion/origen.htm)

Experimentos posteriores al de Miller-Urey

Al experimento de Miller le sucedieron muchas investigaciones en las cuales se realizaron modificaciones en las fuentes de energia y las condiciones iniciales. Algunos de los cientificos que resultaron en este proceso fueron:

- **El experimento de Joan Oró.**

En 1961, este Bioquímico español de la Universidad de Houston, añadió ácido cianhídrico y amoniaco al agua y obtuvo no sólo una mezcla de aminoácidos, sino adenina en abundancia. Más tarde, en 1962, añadió a su mezcla básica formaldehido y encontró ribosa y desoxirribosa (componentes de los ácidos nucléicos). En condiciones prebióticas, llegó a obtener lipidos, componentes fundamentales de la membrana de toda célula viva, con ayuda de una mezcla de compuestos orgánicos derivados del ácido cianhidrico.

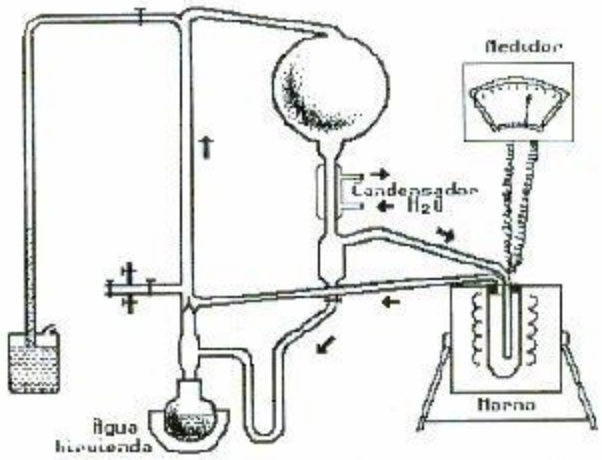
- **La Teoría de Sidney W. Fox**

Este científico norteamericano planteó que la aparición de la vida sobre nuestro planeta no sólo tuvo lugar en el mar, como proponia la teoria de Oparin, sino que también podria haber sucedido sobre la tierra firme. El enfoque de Fox ha sido enormemente fructífero en la generación de experimentos, y prosigue la investigación de muchos laboratorios por todo el mundo.

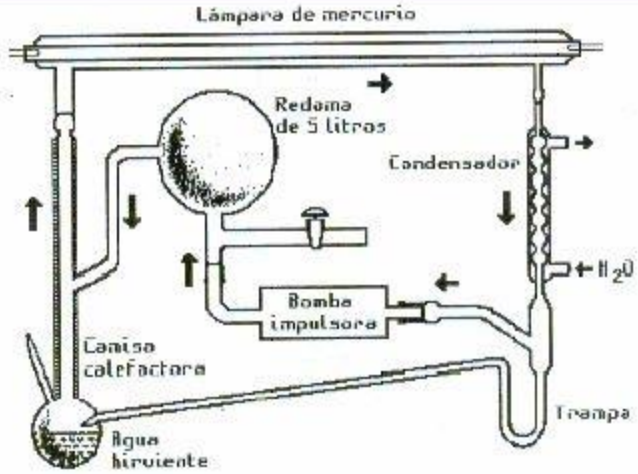
Sydney Fox ha generado un cuerpo impresionante de investigación experimental sobre el origen de la vida. Este biólogo norteamericano demostró que a temperaturas próximas a los 1.000 ℃, una mezcla de gases similares a los que formaron la atmósfera primitiva sufria una serie de transformaciones tales que se lograba la síntesis de aminoácidos, que a su vez se unian formando "protenoides". Al sumergirse en agua, los protenoides generaban un proceso de repliegue sobre si mismos adoptando una forma globosa, las microesferas,

que estaban limitadas por una doble capa exterior, apareciendo así el ancestro de lo que posteriormente sería la membrana plasmática. Las microesferas, a través de la membrana, podían tomar del exterior sustancias como agua, glucosa, aminoácidos, entre otros, que producían la energía suficiente para que continuase el desarrollo de la microesfera. Son ejemplos de microestructuras estables de un diámetro medio de una micra, capaces de producir brotes en incluso de dividirse.

Los protenoides actúan como catalizadores que hacen posible la formación de compuestos más complejos como los nucleótidos (base nitrogenada, ácido fosfórico y un azúcar, ribosa o desoxirribosa), lo cual significó un gran salto ya que el nucleótido puede guardar la información necesaria para su reproducción y sobre la cual el medio sería capaz de actuar.



Aparato empleado por Sidney Fox, para la síntesis de aminoácidos a partir de gases simples.



(Según Kenyon y Steinman, 1969. Biochemical Predestination, Nueva York: McGraw-Hill, Pág. 135).

Aparato empleado para la síntesis de aminoácidos mediante rayos ultravioleta proveniente de una lámpara de mercurio.

Phillip Abelson en 1965 refuttó la hipótesis de evolución química y la atmósfera primitiva postulada por Miller. Su aporte al estudio de las formaciones orgánicas se centró en un experimento en el cual hizo mezclas de diferentes gases logrando aislar prácticamente todos los aminoácidos que se encuentran en las proteínas.

Wilhem Groth y Hanns Von Weyssenhoff en 1960 utilizaron luz ultravioleta en una mezcla de gases y obtuvieron aminoácidos, ácidos grasos livianos y sustancias hidrocarbonadas líquidas.

Sánchez, Kimble y Orgel en 1968 encontraron que uno de los productos importantes de una descarga eléctrica a través de una mezcla de CH_4 y N_2 fue el cianoacetileno que fácilmente se convierte en las piramidinas, citosina y uracilo.

Cyril Ponnamperuma, Ruth Mariner y Carl Sagan en 1963 añadieron adenina a una solución de ribosa y en presencia de luz ultravioleta y

obtuvieron adenosina. Lo más sorprendente es que si había ácido ortofosfórico en la mezcla, obtenían el nucleótido completo.

Ponnamperuma calculó que el mar primordial podría haber llegado a acumular a través de este tipo de reacciones suficientes compuestos orgánicos para que ellos dieran cuenta de algo así como el 1% de su composición. Esto es más de 10^2 toneladas de compuestos disponibles para formar las macromoléculas de que están compuestos los seres vivos.

Carl Sagan propuso que la tierra primitiva estaba sometida a un flujo de rayos UV, 100 veces más fuertes que los actuales, y que el H_2S proveniente del vulcanismo era un agente que catalizaba la transferencia de energía de la luz UV para los elementos transparentes al UV de la atmósfera. En el inicio de la década de los 70, Bar-Nun demostró que las ondas de choque de alta velocidad eran 10.000 veces más eficientes que los otros métodos, en convertir la atmósfera gaseosa reductora de Oparin en pequeñas moléculas.

Yuasa en 1948 consiguió producir purinas y pirimidinas (tipos de bases nitrogenadas en el DNA y el RNA). Actualmente, 14 de los 20 aminoácidos pueden ser producidos bajo condiciones de la atmósfera reductora que se cree que existió en la tierra primitiva.

Muchos investigadores afirman que no tenemos suficientes elementos de juicio para decidir el tipo el tipo de atmósfera que tuvo nuestro planeta inicialmente, la posibilidad de una atmósfera menos reductora ha llevado a que se propongan otras hipótesis para la producción de las sustancias probióticas.

Wächterhäuser en 1997 propuso que las moléculas prebióticas se originaron en fracturas submarinas de la corteza terrestre por las que sale agua supercaliente rica en metales de transición y H_2S. En tales condiciones se llevaría a cabo la reacción:

$$FeS+H_2S \rightarrow FeS_2+H_2+ \Delta$$

La energía producida (Δ) sería utilizada para reducir CO y CO_2 presente en la solución en el agua marina a moléculas orgánicas.

PANSPERMIA

La Panspermia (Richter, 1865; Arrhenius, 1903) sostine que la vida en nuestro planeta es de origen externo (meteoritos y/o cometas). Ponnamperuma analizó cuidadosamente el meteorito que cayó en 1969 en Murchinson, Australia, y encontró en él aminoácidos parecido a los encontrados en el experimento de Miller-Urey. Lo mismo ocurrió cuando se analizó el meteorito de Orgueil (Tolousse, Francia, 1864). Sin embargo, los aminoácidos encontrados eran racémicos, lo que demostraba su origen extraterrestre, pero al mismo tiempo sugerían la pregunta de porqué los que se encuentran en la Tierra son Levógiros (L).

Un experimento que se llevó a cabo en la Universidad de Missouri en los años sesenta mostró que si se pasaba la luz UV circularmente polarizada a través de la atmósfera utilizada por Miller se encontraba predominantemente aminoácidos L o D (Dextrógiro), dependiendo de la dirección de polarización de la luz. En este sentido es interesante el que en la misma nebulosa de Orión donde se encontró ácido cianhídrico se haya demostrado últimamente una fuente muy potente de luz UV polarizada. La existencia de fuentes espaciales de luz UV polarizada en una cierta dirección podría explicar la mayor proporción de aminoácidos L encontrada en meteoritos.

En cuanto a que los aminoácidos que se encuentran en las proteínas actuales en la Tierra sean de tipo L se podría explicar no sólo por el origen cósmico sino también por la interacción de la luz UV con el campo magnético de la Tierra en esas épocas en que no había capa de ozono que disminuyera la intensidad de la radiación que alcanzaba la atmósfera primitiva. Esta interacción causaría polarización si el componente magnético o el eléctrico de la onda se retrasara por la interacción con el campo de la Tierra.

Carl Sagan y Bishum Khare en 1979 simularon la atmósfera de Titán (el mayor satélite de Saturno y el segundo del Sistema Solar por detrás de Ganimedes) y la irradiaron con partículas cargadas para obtener una materia orgánica amorfa y oscura con consistencia de lodo a la que llamaron tholin. Este tholin, al ponerse en contacto con el agua, libera aminoácidos, bases nucleotídicas, hidrocarburos aromáticos policíclicos y otras moléculas orgánicas.

Los hechos y experimentos anteriores nos muestran que es posible formar aminoácidos y nucleótidos, amén de otros ácidos orgánicos, glucosa, ribosa y otros azúcares en ausencia de seres vivos siempre y cuando se den gases como N_2, CH_4, CO_2 y H_2 y existia una fuente de energia. Las moléculas que hemos venido considerando, a pesar de su complejidad, se ensamblaron a través de reacciones simples a partir de sustancias simples. Sin embargo, una vez formadas, no se producen más de ellas a partir de las primeras formadas. Por consiguiente, podemos afirmar que estas moléculas no se pueden autoreproducir y su aumento dependerá solamente de que tengamos suficientes moléculas simples para formarlas y suficiente tiempo para que en las condiciones adecuadas puedan seguir formándose. Este proceso, por sí solo, no puede resultar nunca en un ser vivo. Se necesita algo adicional: una molécula que sirva de molde para hacer más moléculas iguales a si misma.

Julius Rebek (1944-) ha venido trabajando en el problema de sintetizar moléculas capaces de autoreproducirse en un medio acuoso. Para él, el proceso de autorreplicación puede ser un proceso biciclico: en el primer ciclo una molécula sirve de molde para el ensamblaje de otra, mientras que en el segundo ciclo la molécula recién formada sirve de molde para el ensamblaje de otra exactamente igual a la primera y asi sucesivamente. Otra posibilidad es que dos moléculas, A y B, formen un complejo unido por fuerzas de van der Waals, London o aún enlaces de hidrógeno a través de dos superficies mutuamente complementarias.

Utilizó el segundo enfoque. Partiendo de adenina y ribosa, que se pudieron formar espontáneamente en la atmósfera primitiva, encontró que era posible que la adenina fuera perfectamente complementaria a una imida proveniente del triácido de Kemp. Unió a través de un "brazo" de bifenilo la adenina-ribosa con la imida para dar adenina-ribosa-bifenil-imida (ARBI) y la introdujo en una solución que contenia adenina, ribosa, bifenilo e imida. Después de un tiempo encontró que la concentración de ARBI iba aumentando de acuerdo con una curva sigmoide.

Este tipo de curva sugiere una reacción autocatalitica. En efecto, al comienzo, ARBI se encuentra en muy pequeña concentración, pero a medida

que los fragmentos adenina, ribosa, bifenilo e imida se ensamblan sobre las moléculas de ARBI, más y más ARBI se formará aumentando la concentración en un tiempo más corto hasta cuando los fragmentos se agoten. Asi en condiciones apropiadas pueden existir moléculas capaces de auto rreproducción. Esta es una buena base para preguntarnos qué caracteristicas tuvieron que tener las primeras moléculas capaces de autorreproducción que dieron inicio al largo camino hacia la vida como hoy la conocemos en la Tierra.

En el año 1981, Thomas Cech y sus colegas encontraron la existencia de un tipo de ácidos nucléicos con capacidades enzimáticas, capacidad tenida como exclusiva de las proteinas. Se les dio el nombre de ribosinas. Estos descubrimientos le llevaron a obtener el Premio Nóbel de Quimica en 1989.

ALGUNOS EXPERIMENTOS SOBRE EL ORIGEN DE LA VIDA

Científico	*Reacciones*	*Resultantes*
Miller	Amoniaco + Anhidrido Carbónico	Aminoácidos, Purina
Oró	Acido Cianhídrico + Amoniaco	Aminoácidos
Ponnamperuma	Adenina-Azúcar + Etil osfato	Fosfato de Adenosina (ATP)
Scharamman	Fosfatos	Difosfatos, Trifosfatos, Polifosfatos.

REFERENCIAS DEL APÉNDICE VI

http/platea.ppntic.mec.es/~jdelucas/origenvida.htm

http/www.sedin.org/propesp/X0041_1-.htm

http/chimerajaveriana.edu.co/bo302pdf2002/bo30212_p09p.pdf

http /www.monografias.com/trabajos10/lasca/lasca/.shtml

http/www.terra.es/personal/polaino/religión/ideario/elorigen.htm

http/www.ciencia-hoy.retina.ar/hoy17/origen.htm

http//personales.com/mexico/Guadalajara/RV1960/miller.htm

http://www.arvo.net/includes/documento.php?IdDoc=7244&IdSec=406

http://chimera.javeriana.edu.co/bo90/bon_p12/bo90n12_ctp.htm

http://members.fortunecity.es/robertexto/archivo4/evolucion_vida.htm

http://platea.pntic.mec.es/~jdelucas/origenvida.htm

http://fai.unne.edu.ar/biologia/introduccion/origen.htm

http://www.geocities.com/fdocc/miller.htm

http//www.amc.unam.mx/Agencia_de_noticias/Notas_cientificas/np_asp22_miller.html

www.chem.duke.edu/~jds/cruise_chem/Exobiology/miller.html

www.angelfire.com/nt/fairytales/miller.html

www. Nature.com/cgiaf/DynaPage.taf?file=/nsb/journal/v6/n11/full/nsb1199_1004b.html

www.arn.org/docs/odesign/od171/ribo171.htm

www.scripps.edu/research/sr2000/mb01.html

www.cnba.uba.ar/acad/quimica/intro.pdf

wwwprodiversitas.bioetica,org/bases1.htm

www.curie.fr/upload/presse/loubaresseprice

www.nature.com/nbt/wilma/v16n4.890329013.html

www.ipb.csic.es/memoria97-99/memoria97-99.pdf
origins.swau.edu/projects/research/life/prebiotic.html

nai.arc.nasa.gov/news_stories/news_detail.cfm?article=first_home.cfm
www.asa3.org/archive/evolution/199602/00111.html

www.asa3.org/archive/evolution/199602/00111.html

fire.biol.wwu.edu/trent/alles/Archean.pdf

1. Baker J. y Allen G., Biologia e investigación cientifica. Fondo Educativo Interamericano. Mass., EUA, 1970.
2. Brocal E. y González J., "Buscando el origen de la vida (sobre la tierra)". FOSC. Nº 22. 17-21. 2000.
3. Chadwick. Origen Abiogénico de la Vida: Una teoria en Crisis. http://origins.swau.edu/paper/life/chadwick/default s.html
4. Corredor. Origen de las moléculas prebióticas.
   http://http/chimeraveriana.edu.co/bo90/bo90n_pn12_/bo90n12_ctp.htm
5. Kanyon. Más allá de la mentalidad naturalista en las investigaciones sobre el origen de la vida http://sedin.org/prospesp/X0041_1
6. Lucas. El origen de la vida. http://platea.pntic.mec.es/~jdelucas/origenvida.htm
7. Miller S. A production of aminoacids under possible primitive Earth conditions. Science, 117: 528-529, 1953.
8. Miller S. An interview with exobiology pioneer, from primordial soup to the Prebiotic Beach, University of California, San Diego.
9. Oró J. "Syntesis of Adenine from Ammonium Cyanide" Biochem. And Biophy. Res. Comm.1960, 2, 407.
10. Oró J. y Kimball A. "Synthesis of Purines Under Possible Primitive Earth Conditions" Arch. Biochem. Biophys. 1962, 96, 293.
11. Perelson A. y Kauffman S., Molecular Evolution on Rugged Landscapes: Proteins, RNA and the Immune System.
    www.ncsu.edu/chemistry/eaton/evolution/catalyticRNA.html.
12. Raisman J. Origen de la tierra y la vida.
    http://fai.unne.edu.ar/biologia/introduccion/origen.htm
13. Tarrasa. ¿Por qué no creo en los creacionistas?
    http://www.geocities.com/CapeCanaveral/2352/porque05.htm
14. Taylor. ¿De dónde vino la vida? ¿Es la evolución la mejor respuesta cientifica?
    http://christiananswers.net/spanish/q-eden/origin-of-life-es.html
15. Zambrano. Compuestos aromáticos y energia vital para la vida.
    http://chimera.javeriana.edu.co/bo302pdf2002/bo30212_p09p.pdf
    scrippsnews.ucsd.edu/article_detail.cfm?arum=564
16. ¿Existe un creador que se interese por nosotros? Wacht tower bible and society of Pennsylvania, EUA, 1998.

Apéndice VII

CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD DE UNA SOLUCIÓN ELECTROLÍTICA A PARTIR DE LAS CONCENTRACIONES NOMINALES DE LAS SALES

Supongamos que tenemos un litro de una solución acuosa que se ha preparado utilizando las siguientes sustancias:

Sustancia	*Masa utilizada*	*Peso molecular*
NaCl	5,0 g	58,44 g
KCl	3,0 g	74,55 g

Las movilidades absolutas de los iones en agua pura son:

$$u_{Na} = 5{,}2.10^{-4}\ cm^2/V.s$$

$$u_{K} = 7{,}6.10^{-4}\ cm^2/V.s$$

$$u_{Cl} = -7{,}9.10^{-4}\ cm^2/V.s$$

El coeficiente de disociación de todas las sales es $\beta = 0{,}9$. La conductividad de la solución resultante es:

$$\sigma_{total} = \Sigma\sigma_i$$

donde σ_i es la conductividad de cada ión:

$$\sigma_i = N_i q_i u_i$$

en esta expresión N_i es la concentracion del ión i expresada en particulas (iones)/m^3, u_i es su movilidad absoluta y q_i es su carga. Esta carga q_i puede representarse como:

$$q_i = z_i e$$

donde z_i es el número de cargas del ión.

Haciendo uso de la relación entre la movilidad absoluta u_i y la movilidad mecánica $\mu_i (u_i = q_i.\mu_i)$ podemos expresar la conductividad como:

$$\sigma_i = N_i q_i^2 \mu_i$$

Determinemos la concentración de cada ión en partículas/m^3. Para ello debemos calcular primero la concentración nominal c_i de cada sal y luego su actividad (concentración de la parte disociada), $a_i = \beta c_i$. Así tenemos:

Sal	*Concentración Nominal*	*Actividad*
NaCl	$8,56.10^{-2}$ moles/lit	$7,70.10^{-2}$ moles/l
KCl	$4,02.10^{-2}$ moles/lit	$3,62.10^{-2}$ moles/l

La actividad de cada sal expresada en moléculas/m^3 será:

Sal	*Actividad (moléculas/m^3)*
NaCl	$4,64.10^{25}$
KCl	$2,18.10^{25}$

donde hemos utilizado:

$$1m^3 = 10^3 \text{ litros}$$

$$\text{Número de Avogadro} = 6,02.10^{23} \text{ partículas/mol}$$

La concentración de cada ión (iones/m^3) será:

Ión	*Concentración (iones/m^3)*
Na^+	$4,64.10^{25}$
K^+	$2,18.10^{25}$
Cl^-	$6,82.10^{25}$

Las movilidades de cada ión ($\mu_i = u_i/q_i$) serán:

Ión	*μ_i ($m^2/V.s$)*
Na^+	$3,25.10^{11}$
K^+	$4,75.10^{11}$
Cl^-	$4,93.10^{11}$

La conductividad de cada ión será:

$$\sigma_i = N_i q_i^2 \mu_i = N_i (z_i e)^2 \mu_i$$

Así para cada ión tendermos:

Ión	*σ_i (Siemens/m)*
Na^+	$3,86.10^{-1}$
K^+	$2,67.10^{-1}$
Cl^-	$8,62.10^{-1}$

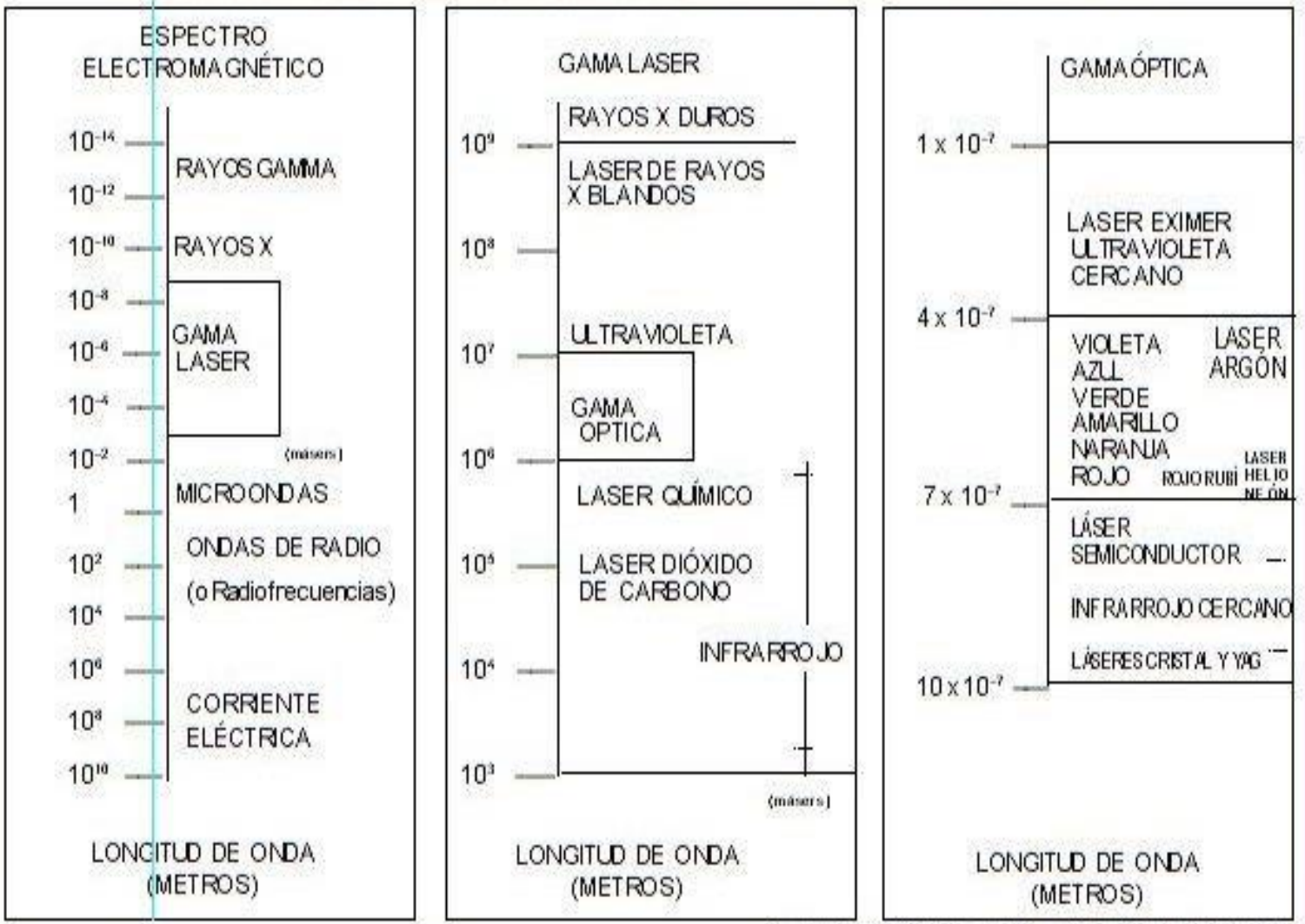
y la conductividad total de la solución debida a los iones será:

$$\sigma_{total} = 1,52 \text{ Siemens/m}$$

Apéndice VIII

Tablas

UBICACIÓN DE LA GAMA LASER DENTRO DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO



Fuente: Teresi, D.; Hecht, J. El Rayo Láser. Salvat. España. 1987.

COMPONENTES PRINCIPALES DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y PARÁMETROS FIJOS ASOCIADOS

Componentes	*Longitud de Onda en el aire (m)*	*Frecuencia* (GHz)	*Energía del Fotón*	
			electrón voltios (eV)	*KJ/ Mol*
Radiación Gamma y X	$1{,}3 \times 10^{-17} - 1{,}3 \times 10^{-8}$	$2{,}3 \times 10^{16} - 2{,}3 \times 10^{7}$	$10^{11} - 10^{2}$	$9{,}6 \times 10^{12} - 9{,}6 \times 10^{3}$
Ultravioleta	$1{,}3 \times 10^{-8} - 3 \times 10^{-7}$	$2{,}3 \times 10^{7} - 10^{6}$	$10^{2} - 4{,}4$	$9{,}6 \times 10^{3} - 4{,}2 \times 10^{2}$
Luz visible	$3 \times 10^{-7} - 8 \times 10^{-7}$	$10^{6} - 3{,}8 \times 10^{5}$	$4{,}4 - 1{,}7$	$4{,}2 \times 10^{2} - 1{,}6 \times 10^{2}$
Infrarrojo	$8 \times 10^{-7} - 10^{-3}$	$3{,}8 \times 10^{5} - 300$	$1{,}7 - 1{,}3 \times 10^{-3}$	$1{,}6 \times 10^{2} - 0{,}13$
Microondas	$10^{-3} - 1$	$300 - 0{,}3$	$1{,}3 \times 10^{-3} - 1{,}3 \times 10^{-6}$	$0{,}13 - 1{,}3 \times 10^{-4}$
Ondas de radio	$1 - 3 \times 10^{3}$	$0{,}3 - 10^{-4}$	$1{,}3 \times 10^{-6} - 4{,}4 \times 10^{-10}$	$1{,}3 \times 10^{-4} - 4{,}2 \times 10^{-8}$

IR E = 3 kcal • mol^{-1} (= 1000 cm^{-1})

Vis E = 50 kcal • mol^{-1} (amarillo)

UV E = 100 – 1000 kcal • mol^{-1}

X E = 1000 – 10^{5} kcal • mol^{-1}

γ E = 10^{5} – 10^{7} kcal • mol^{-1}

Puesto que las energías de enlace son del orden de las 50–100 kcal • mol^{-1}, es justamente el intervalo del visible y parte del UV el que posee energías del mismo orden.

REGIONES ESPECTRALES Y TIPOS PRINCIPALES DE CAMBIO DE ENERGÍA

Longitud de Onda λ		*Frecuencia ν*		Tipo de Radiación	Fenómeno involucrado
cm	*μ*	*Seg⁻¹*	*cm⁻¹ (λ⁻¹)*		
Radiación					
10^4		3×10^6		Ondas de Radio	Energía de los espines nucleares magnética RMN
10		3×10^9	10^{-1}		
0,1	1000	3×10^{11}	10	Microondas	magnética EPR Energía de los espines electrónicos. Rotación
	50		2×10^2	Infrarrojo lejano	Rotación de moléculas
	2,5		4×10^3	Infrarrojo	Vibración de moléculas
Å				Infrarrojo cercano	Vibración / Excitación electrónica
8000	0,8		$1,25 \times 10^4$	Visible	Excitación electrónica
4.000			$2,5 \times 10^4$		
2.000			5×10^4	Ultravioleta cercano	Excitación electrónica
				Ultravioleta lejano	Ionización y excitación electrónica
100			10^6		

1 micrón (μ) = 10^{-4}cm

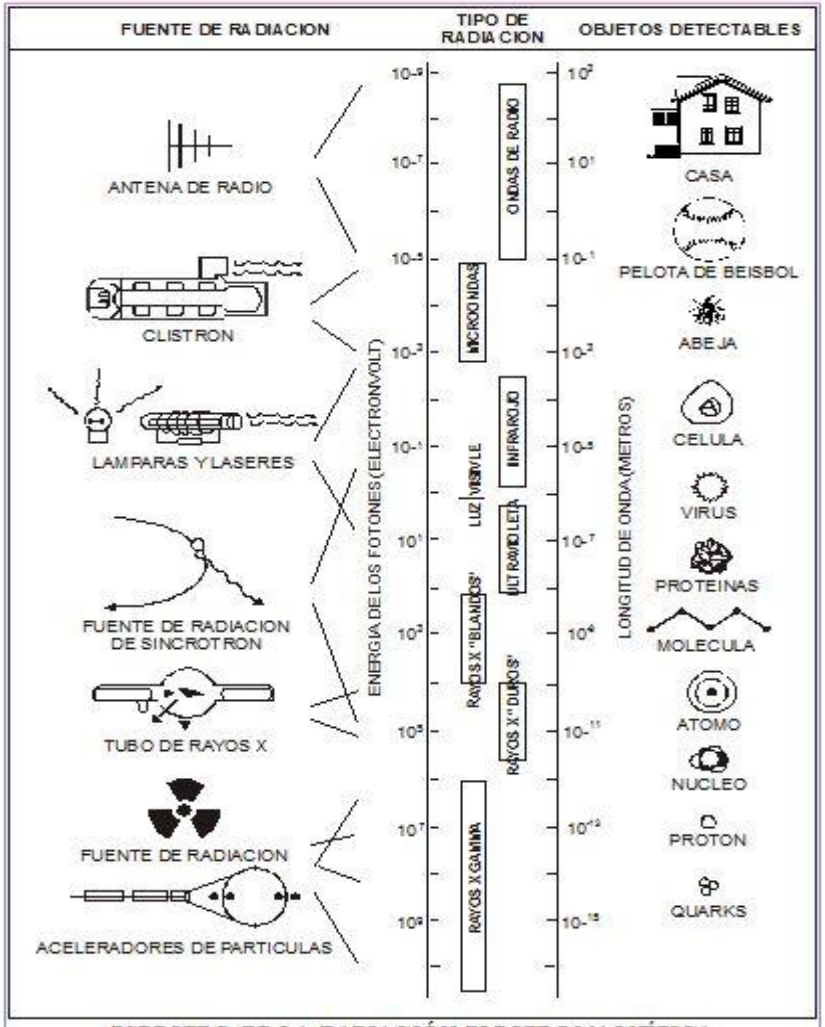
1 Angstrom (Å) = 10^{-8}cm

RMN: Resonancia Magnética Nuclear

EPR: Resonancia Paramagnética Electrónica

ENERGÍAS DE ACTIVACIÓN APROXIMADAS PARA EFECTOS BIOMOLECULARES

Efecto	*eV*	*Kj / mol*	*Frecuencia de la radiación electromagnética equivalente (Ghz)*
Ionización	10	964	$2,4 \times 10^6$
Ruptura de enlaces covalentes	5	482	$1,2 \times 10^6$
Interacción de transferencia de carga	3 – 6	289 – 578	$7,3 \times 10^5$ – $1,5 \times 10^6$
Fotoconducción	1 – 4	96,4 – 386	$2,4 \times 10^5$ – $9,6 \times 10^5$
Semiconducción	1 – 3	96,4 – 289	$2,4 \times 10^5$ – $7,3 \times 10^5$
Interacción de London-van der Waals	1	96,4	$2,4 \times 10^5$
Ruptura de los puentes de hidrógeno	0,6	58	$1,4 \times 10^5$
Relajación dieléctrica de las proteínas	0,4	40	$9,6 \times 10^4$
Energía de activación del agua pura de la conductividad	0,4	40	$9,6 \times 10^4$
Relajación dieléctrica de las cadenas laterales de las proteínas polares	0,3	31	$7,2 \times 10^4$
Relajación dieléctrica del agua	0,2	19	$4,8 \times 10^4$
Ruptura de los enlaces de hidrógeno	0,1 – 0,2	10 – 20	2×10^4 – 5×10^4
Energía térmica (38°)	0,03	3	$7,2 \times 10^3$



ESPECTRO DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

El espectro electromagnético representa una disposición ordenada de las longitudes de onda o energia de los fotones. El espectro sólo se puede cubrir mediante múltiples fuentes de radiación (a la izquierda). La radiación empleada (centro) para detectar el objeto debe tener una longitud de onda igual o menor que sus dimensiones (para evitar efectos de difracción). La radiación producida por un sincrotrón contiene longitudes de onda en las regiones ultravioleta y de rayos x, las cuales permiten estudiar las estructuras atómicas y moleculares.

Capítulo II

Crecimiento de estructuras biológicas

1. INTRODUCCIÓN

Un principio fundamental en Fisica e Ingenieria es que las propiedades de las estructuras dependen fundamentalmente de su tamaño (las bases de un edificio de diez pisos no pueden ser del mismo tamaño que los de una casa de un piso). Los sistemas biológicos son colecciones de materia inanimada dotadas de unas propiedades que en su conjunto denominamos "vida" y por tanto deben obedecer todas las leyes de la Fisica y la Quimica; pero también a otras leyes adicionales.

Numerosos problemas biológicos tienen que ver con el crecimiento proporcional de estructuras y por tanto se pueden investigar utilizando el análisis dimensional de las cantidades físicas involucradas. Uno de ellos es por ejemplo, el problema fundamental en biologia del crecimiento, la división celular. A medida que la célula crece, sus requerimientos energéticos aumentan en mayor proporción a su capacidad de captar energia, lo cual necesariamente conduciria a la muerte, a menos que la célula se divida. Surgen entonces las siguientes preguntas: ¿Es posible tener una célula tan grande como una hormiga, o una hormiga tan grande como un hombre, o un hombre tan grande como un elefante, o por el contrario el tamaño de estas estructuras está determinado por sus funciones?; todas estas preguntas las podemos responder utilizando la similaridad sin necesidad de entrar en rigurosas consideraciones cuantitativas.

Sabemos por experiencia que los mamiferos, tales como el hombre, viven en un ambiente donde la principal fuerza es la gravedad. Los insectos por otra parte están determinados principalmente por la tensión superficial. Un hombre al salir mojado del baño lleva consigo una pelicula de agua de cerca medio kilogramo, pero un insecto mojado tiene que soportar

una película de agua equivalente a muchas veces su peso. Considere por un momento lo restringido de sus movimientos si tuviera que soportar esta cantidad de agua. Las bacterias existen en un mundo donde la viscosidad y el movimiento browniano del fluido donde se encuentran son los factores físicos principales. Es claro, entonces que las estructuras de estos organismos deben estar adaptados para soportar estas fuerzas y que durante su proceso evolutivo estos factores deben haber influenciado la forma y tamaño de sus estructuras anatómicas.

II. CONCEPTO DE SEMEJANZA

Dos figuras geométricas o individuos son semejantes si cualquier dimensión lineal de uno de ellos se obtiene multiplicando la equivalente del otro por una misma constante. Para dos sujetos, uno grande y otro pequeño, se pueden establecer relaciones entre sus alturas ($L_1 = H / h$) y sus diámetros ($L_2 = D / d$).

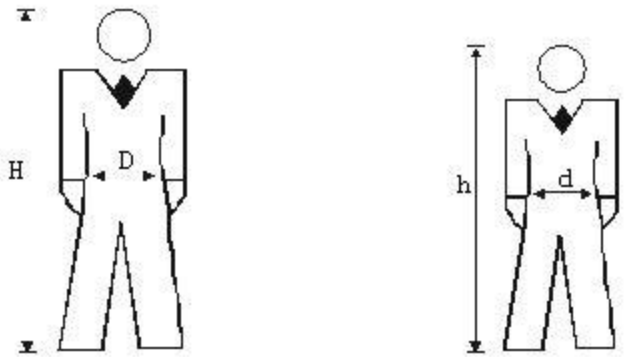


Fig. 1: Dos hombres semejantes, uno grande y otro pequeño.

Ellos serán semejantes si se cumple que:

$$L_1 = L_2 = L$$

Así que:

$$H = L.h$$

y

$$D = L.d$$

Así que:

$$(H/h) = (D/d)$$

Por supuesto es muy difícil encontrar dos individuos de la misma especie o pertenecientes a diferentes especies que cumplan estrictamente esta condición. El grado de semejanza es mayor entre dos individuos de la misma especie (dos hombres normales, por ejemplo, uno bajo y otro alto, un adulto y un niño, etc.), que entre dos individuos de especies diferentes (perro y elefante, hormiga y hombre, etc.)

Analicemos ahora lo que pasa cuando comparamos entre sí, dos figuras geométricas, una grande y otra pequeña.

A. Dos paralelepípedos

Comencemos estudiando lo que sucede cuando se comparan dos paralelepípedos (fig. 2).

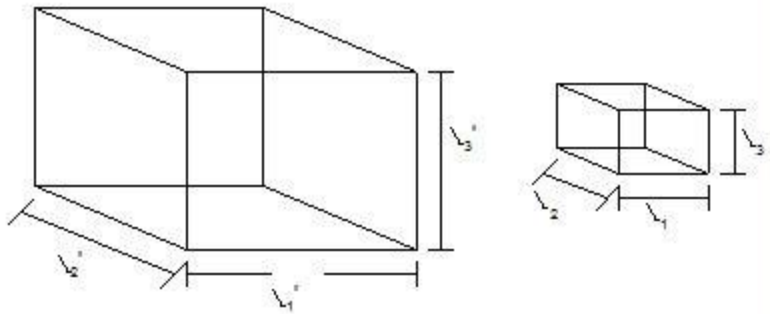


Fig. 2: Dos paralelepípedos con tamaños diferentes

Si definimos los factores de escala L_1, L_2 y L_3, tendremos las siguientes relaciones:

$$L_1 \equiv \frac{l_1'}{l_1} \Rightarrow l_1' = L_1 . l_1$$

$$L_2 \equiv \frac{l_2'}{l_2} \Rightarrow l_2' = L_2 . l_2$$

$$L_3 \equiv \frac{l_3'}{l_3} \Rightarrow l_3' = L_3 . l_3$$

A.1. Relación entre áreas y volúmenes para dos paralelepípedos semejantes

Si los paralelepipedos son semejantes, tendremos que:

$$L = \frac{l_1'}{l_1} = \frac{l_2'}{l_2} = \frac{l_3'}{l_3}$$

y se cumplirá:

$$\left.\begin{matrix} A_1' = l_1' . l_2' \\ A_1 = l_1 . l_2 \end{matrix}\right\} \frac{A_1'}{A_1} = \frac{l_1' . l_2'}{l_1 . l_2} = \left(\frac{l_1'}{l_1}\right).\left(\frac{l_2'}{l_2}\right) = L^2$$

$$\left.\begin{matrix} A_2' = l_2' . l_3' \\ A_2 = l_2 . l_3 \end{matrix}\right\} \frac{A_2'}{A_2} = \frac{l_2' . l_3'}{l_2 . l_3} = \left(\frac{l_2'}{l_2}\right).\left(\frac{l_3'}{l_3}\right) = L^2$$

Asi la relación entre dos áreas cualesquiera equivalentes pertenecientes a dos paralelepipedos semejantes será:

$$A' / A = L^2$$

que se representa como A proporcional a L^2 ($A \propto L^2$).

y la relación entre los volúmenes será:

$$V' / V = (l_1' . l_2' . l_3') / (l_1 . l_2 . l_3) = L^3$$

que se representa como V proporcional a L^3 ($V \propto L^3$).

A.2 Relación entre áreas y volúmenes para dos paralelepípedos no semejantes

En este caso, los factores de escala serán diferentes:

$$L_1 = l_1' / l_1 \; ; \; L_2 = l_2' / l_2 \; ; \; L_3 = l_3' / l_3$$

por lo cual tendremos:

$$A_1' / A_1 = L_1 . L_2$$

$$A_2' / A_2 = L_2 . L_3$$

y

$$A_3' / A_3 = L_1 . L_3$$

El cociente entre volúmenes será:

$$V' / V = L_1 . L_2 . L_3$$

B. Dos cubos

Tomando las definiciones de los factores de escala del ejemplo anterior y como en el caso del cubo se cumple que:

a) $l_1' = l_2' = l_3' = a'$

b) $l_1 = l_2 = l_2 = a$

entonces:

$$L_1 = \frac{a'}{a} ; L_2 = \frac{a'}{a} ; L_3 = \frac{a'}{a}$$

y asi $L_1 = L_2 = L_3$, lo que implica que dos cubos siempre son semejantes.

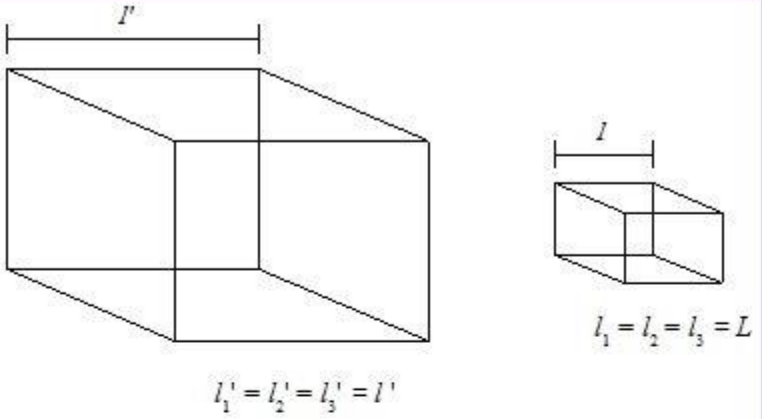


Fig. 2: Dos cubos con tamaños diferentes

B.1 Relación entre áreas y volúmenes para dos cubos

a) $\left(\frac{1'}{1}\right) = \mathrm{L} = \frac{1_{\text{mayor}}}{1_{\text{menor}}}$

b) $\left(\frac{\mathrm{A}_{\text{mayor}}}{\mathrm{A}_{\text{menor}}}\right) = \frac{1'^2}{1^2} = \left(\frac{1'}{1}\right)^2 = \mathrm{L}^2 \rightarrow \mathrm{A} \propto \mathrm{L}^2$

c) $\left(\frac{\mathrm{V}_{\text{mayor}}}{\mathrm{V}_{\text{menor}}}\right) = \frac{1'^3}{1^3} = \left(\frac{1'}{1}\right)^3 = \mathrm{L}^3 \rightarrow \mathrm{V} \propto \mathrm{L}^3$

C. DOS CILINDROS

Definimos los siguientes factores de escala:

$$L_1 = h' / h$$

y

$$L_2 = r' / r$$

Si $L_1 = L_2$ los dos cilindros son semejantes. Es usual modelar a los mamíferos como cilindros.

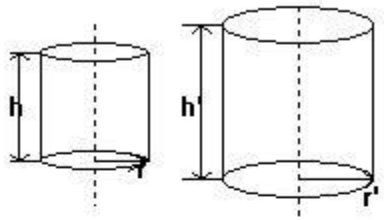


Figura 3: Dos cilindros con tamaños diferentes

C.1 Relación entre las áreas y volúmenes de dos cilindros semejantes

Si existe semejanza $L_2 = L_1 = L$

$$\therefore \frac{A_T}{A_T'} = \frac{1}{L^2} \text{ y } \frac{A_L}{A_L'} = \frac{1}{L^2} \Rightarrow \frac{A_T}{A_T'} = \frac{A_L}{A_L'}$$

$$\frac{A_T'}{A_T} = L^2 \text{ y } \frac{A_L'}{A_L} = L^2$$

$$A_T \propto L^2 \text{ y } A_L \propto L^2 \Rightarrow A_T \propto A_L$$

$$\frac{\mathrm{V_L}'}{\mathrm{V_L}} = \mathrm{L}^3 \therefore \mathrm{V_L} \propto \mathrm{L}^3$$

C.2. Relación entre las áreas y volúmenes de dos cilindros no semejantes

a) Áreas transversales

$$\left.\begin{aligned} \mathrm{A}_{\text{transv}} &= \pi r^2 \\ \mathrm{A}_{\text{transv}} &= \pi r'^2 \end{aligned}\right\} \left(\frac{\mathrm{A_T}}{\mathrm{A_T}'}\right) = \left(\frac{r}{r'}\right)^2 = \left(\frac{1}{L_2}\right)^2$$

$$\frac{\mathrm{A_T}'}{\mathrm{A_T}} = \mathrm{L_2^2} \Rightarrow \mathrm{A_T} \propto \mathrm{L_2^2}$$

b) Áreas laterales

$$\left.\begin{array}{l} A_{lateral} = 2\pi rh \\ A'_{lateral} = 2\pi r'h' \end{array}\right\} \left(\frac{A_L}{A_L'}\right) = \frac{rh}{r'h'} = \left(\frac{r}{r'}\right)\left(\frac{h}{h'}\right) = \left(\frac{1}{L_2}\right)\left(\frac{1}{L_1}\right) = \left(\frac{1}{L_2.L_1}\right)$$

$$\left(\frac{A_L'}{A_L}\right) = L_2.L_1 \Rightarrow A_L \propto L_2.L_1$$

y para los volúmenes tendremos:

$$\left(\frac{V_L'}{V_L}\right) = \left(\frac{\pi(r')^2 h'}{\pi r^2 h}\right) = \left(\frac{r'}{r}\right)^2 \left(\frac{h'}{h}\right) = L_2^2.L_1 \Rightarrow V_L \propto L_2^2.L_1$$

4. Dos esferas

Definamos los siguientes factores de escala:

$$L_1 = \left(\frac{R'}{R}\right);\ L_2 = \frac{\text{Long. circun. grande}}{\text{Long. circun. pequeña}} = L_1$$

Así que dos esferas siempre son semejantes.

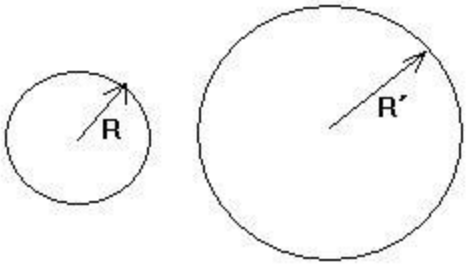


Fig. 4: Dos esferas con tamaños diferentes

III. EL PROBLEMA DE LAS DOS HORMIGAS SEMEJANTES

Comparemos dos hormigas semejantes (forma y material idénticos) una normal y otra gigante:

Hormiga gigante *Hormiga normal*

Fig. 5: Dos hormigas de forma semejante pero de distinto tamaño

Definamos el factor de escala L como:

$$L = h'/h$$

donde h'es la longitud de la hormiga gigante y h es la longitud de la hormiga normal. El cociente entre los pesos de ambas hormigas será:

$$P_{gigante} / P_{normal} = D'g\,V' / D\,g\,V$$

donde D, g y V representan a la densidad, la aceleración de gravedad y el volumen. Si suponemos que ambas hormigas tienen la misma densidad:

$$D' = D$$

entonces:

$$P_{gigante} / P_{normal} = V'/ V$$

Pero, anteriormente demostramos que el cociente entre los volúmenes de dos estructuras semejantes es L^3. Así:

$$P_{gigante} / P_{normal} = L^3$$

Fuerza de la hormiga

La fuerza muscular de una hormiga (o de cualquier organismo) es proporcional a la sección transversal de sus músculos. Por ejemplo, en el caso de un levantador de pesas, la longitud de sus brazos es igual al de una persona que no practica este deporte; sin embargo, el grueso de sus brazos y piernas es muy superior (recuerde la estructura de los fibras musculares: las fibras de los músculos que ejercen grandes fuerzas son gruesas y cortas, mientras que las de los músculos rápidos son delgadas y largas). Realmente, el área transversal involucrada, es el área efectiva

constituida exclusivamente por fibras musculares, exceptuando cualquier otro tipo de tejido.

La fuerza muscular se representa como:

$$f = \sigma A$$

donde σ es una constante (que depende del material, en este caso, la resilina, que constituye las fibras musculares de la hormiga, y es idéntica para ambas hormigas) y A es la sección transversal de las patas de la hormiga. El cociente entre las fuerzas correspondientes a la hormiga gigante y a la normal será:

$$fg / fn = A' / A$$

que como hemos demostrado anteriormente, para estructuras semejantes es:

$$fg / fn = L^2$$

Es decir, la hormiga gigante es L^2 más fuerte que la hormiga normal.

Fortaleza relativa

Definamos la fortaleza (fuerza) relativa de una hormiga como:

Fr = peso que puede levantar la hormiga / peso de la hormiga

En el caso de la hormiga gigante tendremos:

Frg = peso que puede levantar la hormiga g / peso de la hormiga g

y para la hormiga normal:

Frn = peso que puede levantar la hormiga n / peso de la hormiga n

Si hacemos el cociente Frg / Frn obtenemos:

$$Frg / Frn = (Plg / Pln) (Pn / Pg)$$

Ahora bién:

$$Plg / Pln = fg / fn = L^2$$

por otra parte:

$$Pg / Pn = L^3$$

$$Frg / Frn = (Plg / Pln) (Pn / Pg) = L^2 (1 / L^3) = 1/ L$$

Esto significa que la fortaleza relativa de la hormiga gigante es mas pequeña que la normal en un factor 1/ L (L > 1). Asi que mientras más grande se hace la hormiga puede levantar menor cantidad de veces su propio peso.

IV. FORTALEZA RELATIVA DE DOS INDIVIDUOS PERTENECIENTES A ESPECIES DIFERENTES

Se conoce por estudios experimentales que la fortaleza relativa de una hormiga normal es igual a 3 (es decir, puede levantar tres veces su propio peso) y la de un hombre normal es 0,5 (puede levantar la mitad de su peso); por supuesto, un levantador de pesas tendrá una fortaleza relativa mayor que este valor ¿Esto significa que la hormiga posee mayor fortaleza relativa que el hombre? Para responder a esta pregunta, debemos comparar las dos estructuras cuando tienen el mismo tamaño. Por ejemplo, llevemos la hormiga al mismo tamaño del hombre y denominemos a esta hormiga como gigante. Su fortaleza relativa será:

$$Frhg = (1/ L) Frhn$$

Suponiendo que la altura del hombre es 173 cm y la de la hormiga normal es 1,2 cm, entonces:

$$Frhg = (1 / 144) 3 = 1 / 48$$

Asi que la hormiga gigante puede levantar sólo una cuarenta y ochoava parte de su peso. Es decir, no podria ni siquiera levantar sus propias patas para subir por encima de pequeños obstáculos, por lo cual este tamaño no es viable para una hormiga. La comparación de la fortaleza relativa de la hormiga gigante con la correspondiente al hombre normal arroja el siguiente resultado:

$$[Frhormiga / Frhombre]_{\text{tamaño del hombre normal}} =$$

$$[Frhormiga\ gigante / Frhombre\ normal] = (1/ 48) / 0,5 = 1 / 24$$

Es decir, la hormiga gigante posee una fortaleza relativa que es la venticuatroava parte de un hombre de su mismo tamaño. También se puede comparar la fortaleza relativa de un hombre del tamaño de una hormiga (hombre enano) con la fortaleza relativa de una hormiga normal:

[Frhormiga / Frhombre] $_{\text{tamaño de la hormiga}}$ =

[Frhormiga normal / Frhombre enano] = 3 / (144x 0,5) = 1 / 24

Es decir, que cualquiera sea la escala (siempre que sea la misma) a la cual se comparen el hombre y la hormiga, el primero tendrá una fortaleza relativa que será 24 veces mayor que la segunda.

Peso que se puede soportar

Si lo que queremos considerar no es la fortaleza relativa muscular sino el peso que una estructura (mecánica o biológica) puede soportar, debemos considerar en vez del área transversal muscular, el área transversal de los huesos. Para un animal de una determinada forma, la fortaleza relativa de sus músculos depende de su tamaño como ya lo hemos demostrado.

En la naturaleza, encontramos que la forma de los grandes animales es marcadamente diferente a la de los animales pequeños. Si aumentamos el tamaño de un perro a la escala de un elefante, observaremos que el diámetro de sus patas es mucho menor que las del elefante. Así pues, un animal del tamaño de un elefante no puede tener la misma forma que un perro (no es semejante a el) porque la fortaleza relativa de sus huesos (calculada como el cociente entre el peso que pueden soportar los huesos y el peso del animal) sería muy pequeña. Esto es, los huesos y músculos de los grandes animales deben ser desproporcionalmente gruesos comparados con los animales pequeños. Es decir, los animales grandes y pequeños de diferentes especies, son entre si no semejantes (alométricos).

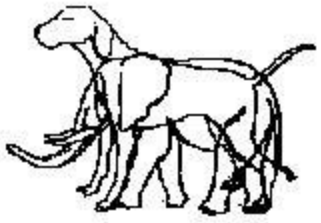


Fig. 6: Un perro y un elefante dibujados al mismo tamaño

V. LÍMITES ESTÁTICOS Y DINÁMICOS

Se han preguntado Uds. porque no existen animales terrestres más grandes que los elefantes. La respuesta es que el tamaño de los animales erguidos no puede exceder ciertos límites usando los materiales que proporciona la naturaleza. Estos límites pueden ser estáticos y dinámicos.

Consideremos primero los límites estáticos. La resistencia de las partes que soportan el cuerpo de un animal, las extremidades, son proporcionales a su secciones transversales. Así, si un animal pequeño que tiene patas de radio r_1 fuera aumentado de tamaño por un factor de escala L, tal que el radio de sus patas fuera $L.r_1$, el área de sus extremidades deberá incrementarse por un factor L^2 así como también su fuerza muscular (o el peso que pueden soportar). Estas extremidades, sin embargo, deberán soportar el peso del animal, el cual como vimos anteriormente aumenta en un factor L^3. Si el animal fuera aumentado por un factor de escala L=10, la fuerza de las extremidades se incrementaría por un factor de 100, sin embargo, su peso se incrementaría por un factor de 1000. En estas condiciones el colapso sería inevitable. A medida que el cuerpo de los animales se hace mas grande, las extremidades deberán hacerse relativamente más gruesas, incrementado sus diámetros como $L^{3/2}$. Así, un venado que es relativamente liviano puede tener patas relativamente delgadas y veloces, mientras que mucho del espacio debajo del cuerpo del elefante debe ser ocupado por gruesas patas. Sin embargo, si el peso del cuerpo estuviera balanceado por otras fuerzas, tal como la fuerza de empuje de los líquidos, el animal puede lograr grandes proporciones con un esqueleto relativamente poco resistente, como es el caso de las enormes ballenas, pero cuando estas encallan (llegan a sitios de poca profundidad) y el empuje cesa, su enorme peso las asfixia, porque sus huesos no pueden soportar la enorme masa muscular.

Hay también límites dinámicos que debemos considerar, los cuales restringen el tamaño de los animales, ya que éstos se deben mover para subsistir. Para mover una extremidad el animal debe realizar trabajo. El trabajo requerido para mover una extremidad de masa m una distancia d es proporcional a m x d. Ya que para animales semejantes m es proporcional a L^3. En condiciones normales este desplazamiento es proporcional a la longitud de la extremidad, por lo tanto, para animales

semejantes, d es proporcional a L. Por lo tanto el trabajo requerido será:

$$W = F \cdot d = m \cdot g \cdot d$$

y

$$W \sim L^4$$

Para realizar este trabajo los músculos deberán ejercer durante el recorrido fuerzas internas F. Como vimos, estas fuerzas son proporcionales a L^2 y la distancia será proporcional a L. Por lo tanto, el trabajo que podria realizar el animal será proporcional para animales semejantes a $W = F \cdot d \sim L^3$. Como vemos en este caso el animal también está en problemas, pues el trabajo requerido para mover sus músculos se incrementará más rápido (L^4) que la habilidad del animal para proporcionar este trabajo (L^3). Dejamos al lector las posibles soluciones a este problema.

VI. FACTOR DE VIABILIDAD CELULAR

Este factor adimensional se define para una célula, como:

v = oferta de oxigeno / requerimiento de oxigeno

para una célula. La oferta y el requerimiento (demanda) de oxigeno se definen como:

$$\text{Oferta } O_2 = (V/t)\,of = K_1 . \text{área celular}$$

$$\text{Requerimiento de } O_2 = (V/t)\,req = K_2 . \text{volumen celular}$$

donde V/ t es el volumen de oxigeno ofertado o requerido por unidad de tiempo. Se propone al lector reflexionar sobre el significado y la relación entre los términos requerimiento (o demanda), oferta (o suministro) y consumo de nutrientes y oxigeno. El factor de viabilidad se escribirá como:

$$v = (K_1 . \text{área celular}) / (K_2 . \text{volumen celular})$$

o bién:

$$v = K\ (\text{área celular} / \text{volumen celular})$$

donde K_1 y K_2 son constantes (y por lo tanto, también K) y no dependen del tamaño del especimen. Evidentemente, para que v sea adimensional, K debe tener unidades de longitud.

Ejemplo: Una célula esférica de radio R'se divide en dos células hijas iguales de radio R cada una de ellas. (Ver fig. 7)

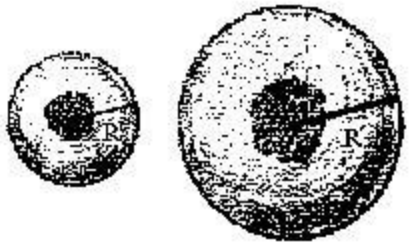


Fig. 7: Dos células esféricas en diferentes etapas de crecimiento.

a) Hallar el factor de escala. b) Encontrar el cociente del área total de las células hijas entre el área de la célula madre. c) Encontrar el factor de viabilidad de las células hijas, suponiendo que el factor de viabilidad de la célula madre es 1.

Respuestas:

a) Suponiendo que no hay pérdida ni ganancia de material celular durante la división celular, la masa se conserva. Asi que:

$$M_{madre} = 2\, m_{hijas}$$

Si suponemos que las densidades de la célula madre y de las células hijas son iguales, entonces los volúmenes se conservan:

$$V_m = 2\, V_h$$

o bién:

$$(4\pi / 3)\, R'^3 = 2\, (4\pi / 3)\, R^3$$

Asi que:

$$R'^3 = 2\, R^3$$

o bién:

$$L = R' / R = (2)^{1/3} = 1{,}26$$

b) El valor del cociente:

Área total células hijas / Área célula madre = $2\ (4\pi\ R^2 / 4\pi\ R'^2)$

$= 2\ (R / R')^2 = 2\ (1/L)^2 = (2)\ (\ 1 / 2^{1/3}\ )^2 = 2^{1/3} = L$

c) El factor de viabilidad de la célula madre se expresa como:

v_{madre} = oferta de O_2 / consumo de O_2 = $K\ (\ 4\ \pi\ R'^2) / (4\pi /3) R'^3$

o bién:

$$v_{madre} = 3\ K / R'$$

y el factor de viabilidad de las células hijas será:

$$v_{hija} = 3\ K / R$$

y el cociente v_{hija} / v_{madre} será:

$$v_{hija} / v_{madre} = R' / R = L$$

Asi que:

$$v_{hija} = L\ v_{madre} = L = 1{,}26$$

Este resultado nos indica que la división celular incrementa el factor de viabilidad. Una célula joven tiene un factor de viabilidad mayor que uno. La última relación indica que cuando la célula crece su factor de viabilidad disminuye. Con el fin de evitar la asfixia la célula debe detener su crecimiento o dividirse. Por medio de la división, la célula grande con v pequeño es reemplazada por dos células más pequeñas cada una de ellas con un v mayor. Obsérvese que la célula madre ya no existe. Esto no ocurre a niveles mayores de organización celular, por ejemplo, una hembra de mamifero no perece usualmente cuando pare.

Para aumentar la relación superficie/volumen (y evitar asi la muerte) sin necesidad de dividirse, la naturaleza aplica varias soluciones: aplanamiento de membranas y capas superficiales; formación de elementos filiformes, ramificaciones, repliegues y alargamiento de las zonas de intercambio; y creación de órganos huecos y cavidades.

Se propone al lector demostrar si la relación $v_{hija} = L\ v_{madre}$ tiene

validez general, sin importar que se cumpla o no la condición de esfericidad que hemos supuesto; siempre que se cumpla la condición de semejanza entre la célula madre y sus hijas.

VII. LEYES DE KLEIBER

a) Primera ley

Sea una columna uniforme de radio r, altura h y masa m. (ver fig. 8)

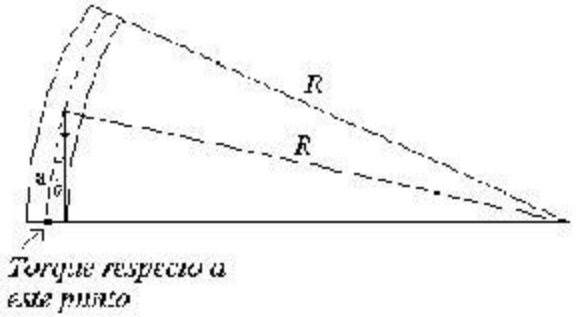


Figura 8: Columna cilíndrica flexionada por su propio peso.

Para que ella no se doble debido a su propio peso, el momento (torque) debido al peso (t_p) y el momento (t_f) debido a la flexión de la columna deben igualarse. El torque debido al peso será:

$$t_p = mg\ a\ \text{sen}\ (180° - \theta) = mg\ a\ \text{sen}\ \theta$$

donde a es el brazo de palanca. Este torque también puede escribirse como:

$$t_p = D\ (\pi\ r^2\ h)\ g\ d$$

donde D es la densidad del material de la columna, $(\pi\ r^2\ h)$ es el volumen de la misma, d es la proyección del brazo de palanca en la dirección perpendicular al peso (a sen θ) y g es la aceleración de gravedad.

El torque debido a la flexión será:

$$t_f = E\ (\ I / R)$$

donde E es el módulo de Young, I es el momento de inercia respecto a la superficie neutra ($\int X^2 dA$) y R es el radio de curvatura de la columna

flexionada. El momento de inercia respecto a la superficie neutra es:

$$I = \pi r^4 / 4$$

Igualando ambos momentos:

$$D (\pi r^2 h) g d = E (I / R) \qquad (*)$$

Suponiendo que el centro de gravedad se encuentra en h /2, entonces:

$$R^2 = (R - d)^2 + (h/2)^2$$

y desarrollando la expresión anterior:

$$R^2 = R^2 + d^2 - 2Rd + h^2/4$$

y despreciando d^2 respecto a los otros términos, obtenemos:

$$d = h^2 / 8R$$

y sustituyendo esta expresión en (*), obtenemos:

$$h = (2 E / Dg)^{1/3} r^{2/3}$$

que es la máxima altura que puede alcanzar una columna cilíndrica sin flexionarse. Si comparamos dos columnas una grande y otra pequeña, no semejantes, construidas con el mismo material, obtendremos :

$$L_1 = L_2^{2/3}$$

donde

$$L_1 = h'/h \text{ y } L_2 = r'/r.$$

b) Segunda ley: ley de la tasa metabólica

La fuerza muscular de un individuo es proporcional al área transversal del músculo. Si suponemos que dicho músculo tiene forma cilíndrica, entonces:

$$F_m \propto \pi r^2$$

donde r es el radio del cilindro. Por otra parte, la masa del músculo será proporcional a su volumen:

$$M \propto r^2 l$$

Haciendo uso de la primera ley de Kleiber ($l \propto r^{2/3}$), obtenemos:

$$M \propto r^2 r^{2/3} = r^{8/3}$$

De lo cual se concluye que:

$$r \propto M^{3/8}$$

y la fuerza muscular:

$$F_m \propto (M^{3/8})^2 = M^{3/4}$$

Esta última expresión es conocida como segunda ley de Kleiber y es válida para individuos no semejantes (alométricos).

Como la la tasa metabólica (TM = $\Delta E / \Delta t$) de un sujeto (energía requerida en la unidad de tiempo) depende de la potencia mecánica muscular que el pueda desarrollar (que depende de la fuerza muscular) entonces la segunda ley de Kleiber muchas veces se expresa como:

$$TM = C M^{3/4}$$

donde C es una constante para todos los individuos que se consideren, siempre y cuando están todos en las mismas condiciones, por ejemplo, la basal. Por otra parte, el requerimiento de oxígeno (RO_2) depende del requerimiento energético. Así, también se tiene que:

$$RO_2 = A M^{3/4}$$

donde A es una constante.

La oferta de O_2 depende del área de intercambio (A_1) de la fibra muscular:

$$OFO_2 \propto A_1 = 2 \pi r l$$

y utilizando la primera ley de Kleiber ($l \propto r^{2/3}$) obtenemos:

$$OFO_2 \propto r l = r. r^{2/3} = r^{5/3}$$

y como para un cilindro:

$$r \propto M^{3/8}$$

entonces:

$$OFO_2 = (M^{3/8})^{5/3} = M^{5/8}$$

o bién:

$$A_t = \text{Superficie del cuerpo} \propto M^{5/8} \approx M^{0,63}$$

De acuerdo con los resultados obtenidos para individuos no semejantes se cumple que:

$$Fm \propto A_t \propto TM$$

así que:

$$TM / A_t = \text{constante}$$

donde A_t es el área transversal o equivalentemente:

$$TM / M^{3/4} = \text{constante}$$

Además se tiene que:

$$TM / A_{lateral}$$

y

$$TM / M^{5/8}$$

no son constantes, ni tampoco $TM / M^{2/3}$.

Tasa metabólica para individuos semejantes

Si los individuos que se consideran son semejantes, entonces el área transversal es:

$$At \propto L^2$$

y como la masa para individuos semejantes cumple con:

$$M \propto V \propto L^3$$

entonces, despejando L:

$$L \propto M^{1/3}$$

Así que:

$$At \propto M^{2/3}$$

y la tasa metabólica será:

$$TM \propto RO_2 = C\, M^{2/3}$$

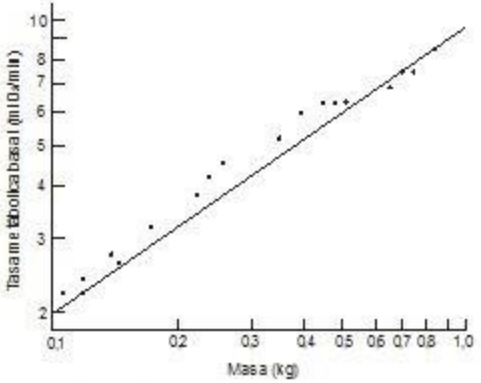


Fig 9: Representación de la tasa metabólica basal (TMB) en función de la masa corporal. Tasa metabólica basal de individuos de la misma especie (cobayas) de varios tamaños representada en función de la masa corporal individual. La pendiente de la línea indica que la TMB es proporcional a la masa corporal elevada a la potencia 0,67 para animales cuya escala es semejante.

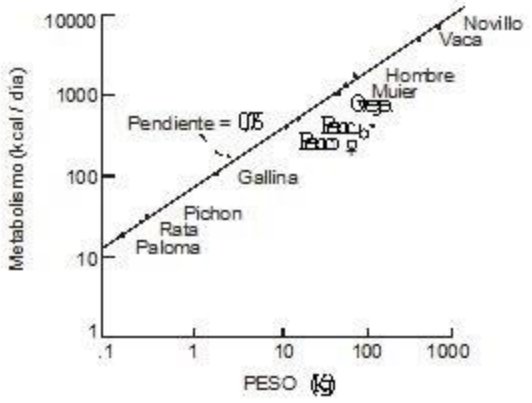


Fig. 10: Logaritmo del metabolismo graficado contra el logaritmo del peso para diversos tipos de animales.

donde C es una constante.

La oferta de O_2 es proporcional al área lateral de la fibra muscular:

$$OFO2 \propto Al$$

pero si existe semejanza, $A_l \propto A_t \propto M^{2/3}$. Así que:

$$OFO_2 \propto M^{2/3}$$

o bién: A_l = Superficie del cuerpo $\propto M^{2/3} \approx M^{0,67}$

En individuos semejantes se cumple que:

$$TM / A_t \ , \ TM / A_l \ \text{ y } TM / M^{2/3}$$

son constantes.

Las figuras 9 y 10 ilustran la tasa metabólica vs la masa del animal, para semejanza y no semejanza, respectivamente.

VIII. VELOCIDAD DE CARRERA

Una aplicación interesante del terorema del trabajo y la energia combinado con el crecimiento proporcional es el estudio de la velocidad de carrera que pueden alcanzar los animales. Una vez que el animal ha alcanzado una velocidad constante, no es necesario realizar trabajo externo para mantener esta velocidad V. Sin embargo, cuando una extremidad hace contacto con el suelo, se pone en reposo momentáneamente mientras el resto del cuerpo continúa moviéndose. Cuando la pata, de masa m, es levantada, ésta es acelerada hacia adelante por un grupo de músculos agonistas hasta alcanzar la velocidad del cuerpo, luego es desacelerada por otro grupo de músculos antagonistas hasta que la pata hace contacto de nuevo con el suelo. Por lo tanto, un grupo de músculos realiza trabajo para cambiar la energia cinética de la extremidad de 0 a (1/2) mV^2, mientras otro conjunto de músculos lo hace para cambiar la energia cinética de la extremidad de (1/2 mV^2) a 0. Es de observar que el principal esfuerzo durante la carrera es el trabajo requerido para continuamente acelerar y desacelerar las extremidades. Obsérvese que la enorme ventaja de la rueda es que permite la locomoción sin necesidad de este continuo cambio de energia cinética.

El trabajo realizado por uno de los grupos de músculos es $W = F_m.d$, donde Fm es la fuerza ejercida por el músculo al contraerse una distancia d. Por lo tanto, utilizando el teorema del trabajo y la energia:

$$W_{mus} = \Delta E_c$$

o bién:

$$F_{mus} \times d = (1/2)\ m_p V^2$$

despejando V^2 obtenemos:

$$V^2 = 2(F_{mus} \cdot d) / m_p$$

donde hemos ignorado el roce del aire y del pavimento.

Consideremos dos animales de diferente tamaño y de forma semejante. Para el animal grande y el pequeño tendremos, respectivamente:

$$V_G^2 = 2(F_{musG} \cdot d_G) / m_G$$

$$V_p^2 = 2(F_{musP} \cdot d_p) / m_p$$

Hemos demostrado anteriormente que para animales semejantes se cumple:

$$d_p = L \cdot d_p$$

$$F_{musG} = L^2 \cdot F_{musP}$$

$$m_G = L^3 \cdot m_p$$

Si hacemos las sustituciones pertinentes en V_G obtendremos que:

$$V_G = V_p$$

Es decir, que las velocidades de carrera de dos animales, uno grande y otro pequeño, son iguales siempre que ellos sean semejantes.

Si evaluamos la expresión de la velocidad de carrera para un determinado animal:

$$V^2 = 2(F_{mus} \cdot d) / m$$

podemos observar que un incremento en dicha velocidad puede obtenerse aumentando la longitud de las patas (d grande) y/o haciendo que las patas sean muy ligeras (m pequeña). Esto es lo que sucede, por ejemplo,

en los caballos de carrera, ciervos, galgos, gepardos, etc. Generalmente, para que la masa de la pata sea pequeña, sus músculos están incorporados fuera de la pata. La mayoria de los grandes felinos tienen patas más bien gruesas porque ellos se han adaptado al salto repentino pero con velocidad moderada. Su ventaja reside en la sorpresa que utilizan para cazar a su presa, puesto que no son lo suficientemente rápidos para atraparla corriendo.

IX. VELOCIDAD DE LA MARCHA

El análisis de la velocidad de carrera que hicimos anteriormente nos mostró que los animales semejantes corren a la misma velocidad, no obstante su tamaño. Ahora, mostraremos que se cumple una ley de escala diferente para la velocidad con la cual caminamos. En el caminar, una vez que la pierna es despegada del suelo, oscila libremente como un péndulo (simple, en primera aproximación) de longitud l (longitud de la pierna). Así que, el número de pasos por unidad de tiempo (n):

$$n = \text{número de pasos / tiempo} = \text{frecuencia del péndulo}$$

y la velocidad de marcha será:

$$v = f \cdot (\text{longitud del paso})$$

La frecuencia del péndulo simple es:

$$f = 1 / (2\pi\sqrt{\ell / g})$$

Así que, para individuos semejantes:

$$f \propto 1 / \sqrt{L}$$

Por otra parte,

$$\text{longitud del paso} = \ell\,\Theta$$

donde Θ es el ángulo pendular en radianes. Para individuos semejantes y suponiendo que Θ no cambia, tenemos que:

$$\text{longitud del paso} \propto L$$

La velocidad de marcha, para animales semejantes se escribirá entonces como:

$$v \propto L / \sqrt{L} = \sqrt{L}$$

Es decir, los animales de mayor tamaño caminan más rápido (mayor velocidad) que los más pequeños, pero con una frecuencia de pasos menor o equivalentemente, dan menos pasos para recorrer la misma distancia (recuerde que n = f.t). Piensen en una persona alta caminando al lado de un enano.

X. LEY DE ESCALA PARA EL SALTO VERTICAL

Para que un animal pueda saltar debe doblar primero sus piernas y luego, extenderlas rápidamente (ver fig.11).

La fase que le permite alcanzar una velocidad de despegue V_d (fase inicial) puede ser analizada suponiendo que en dicha fase la aceleración media neta es a_d. En esta fase la velocidad aumenta desde cero (piernas flexionadas) hasta V_d (piernas extendidas). La velocidad de despegue puede calcularse como:

$$V_d^2 = 2\, a_d\, d$$

donde d es la distancia que se mueve el punto medio del cuerpo cuando se pasa de piernas flexionadas a piernas extendidas.

Cuando el animal ya está en el aire, solamente la aceleración de gravedad actúa sobre él. Esta fase, que denominaremos segunda fase del salto, se inicia con una velocidad V_d y termina con una velocidad cero. Así, la velocidad de despegue será:

$$V_d^2 = 2\, g\, h$$

donde h es la altura del salto o equivalentemente la distancia que se mueve el punto medio del cuerpo desde el momento en que las piernas están extendidas hasta que el animal está momentáneamente parado en el aire. Utilizando los datos de la tabla I se puede calcular la velocidad y la aceleración de despegue. Para humanos tenemos:

$$V_d = (2 \cdot 9{,}8 \cdot 1)^{1/2}\ \text{m/s} = 4{,}4\ \text{m/s}$$

$$a_d = (h / d)\, g = (1 / 0{,}5)\, 9{,}8\ \text{m/s}^2 = 19{,}6\ \text{m/s}^2$$

Tabla I

Distancias de (primera fase) y altura del salto vertical (h) para diversos animales (segunda fase).

Animal	*Distancia (d) metros*	*Altura del salto (h) metros*
humanos	0,5	1,0
canguro	1,0	2,7
lemur (mono)	0,16	2,2
rana	0,09	0,3
langosta	0,03	0,3
pulga	0,0008	0,1

Considerando que entre las posiciones a y b (fase de despegue) la aceleración a es constante, entonces por cinemática, la velocidad de despuegue satisface: vd2= 2ad, considerando que parte del reposo.

Por otra parte, la energia mecánica se conserva entre la posición b y c. Asi que:

$$E_{mb} = \tfrac{1}{2} m V_d^2 = E_{mc} = mgh$$

entonces: Vd2 = 2gh, igualando las dos expresiones para Vd, se obtiene que h = ad/g. Este resultado cuando se evalúa para para los diferentes mamiferos permite concluir que h es independiente del tamaño del animal.

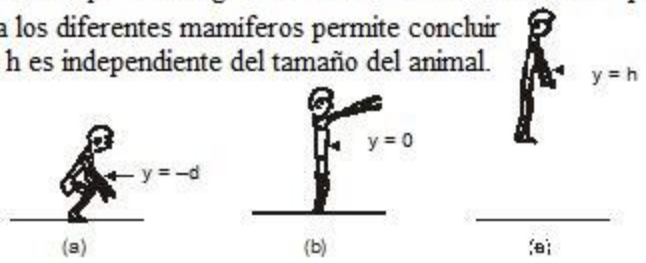


Fig. 11: Posiciones durante el salto vertical; (a) agachado, con V = 0; (b) completamente extendido en el despegue, con V = V_d; (c) altura máxima, con V = 0. La coordenada y indica la altura del punto medio de la persona. El origen (y = 0) está en la altura del punto medio de la posición mostrada en (b). Ref. [15].

XI. LEY DE ESCALA DE LA FRECUENCIA CARDÍACA

El gasto cardiaco de los mamiferos está relacionado directamente con el volumen de sangre expulsado por el corazón en cada latido y por la frecuencia cardiaca. La expresión que relaciona a estas variables es:

$$GC = VL \times F_c$$

despejando la Fc obtenemos:

$$Fc = GC / VL$$

Analicemos ahora las leyes de escala del gasto cardiaco y del volumen latido. En el primer caso, sabemos que el gasto de un mamifero depende del consumo de oxigeno del mismo y este a su vez depende de la tasa metabólica, o equivalentemente de la fuerza muscular:

$$GC \sim (\text{Consumo } O_2) \sim TM \sim F_{mus}$$

Conocemos de discusiones anteriores que la fuerza muscular es proporcional al área transversal del músculo.

Para animales semejantes se cumple que:

$$AT \sim L^2$$

Por otra parte, el volumen latido es proporcional al volumen total de sangre del mamífero y este a su vez es proporcional a la masa (o al volumen) del mamifero. Así que:

$$VL \sim V_{\text{total de sangre}} \sim V_{\text{animal}} \sim L^3$$

Entonces, la frecuencia cardiaca para sujetos semejantes será proporcional a:

$$F_c \sim L^2 / L^3 = 1 / L$$

y como:

$$L \sim V^{1/3} \sim M^{1/3}$$

entonces:

$$F_c \sim M^{-1/3}$$

En el caso de animales no semejantes:

$$F_c = (Gc / VL) \sim (TM / masa) \sim (M^{3/4} / M) = M^{-1/4}$$

En conclusión, el corazón de un animal grande late más despacio que el corazón de uno pequeño. Comparemos las frecuencias cardiacas, de un hombre y de un mono. Suponiendo semejanza, obtenemos que:

$$F_{c\ hombre} / F_{c\ m} = (1/L) = (1/2{,}5) = 0{,}4$$

y el valor real es 0,5 , lo cual indica que los animales no son semejantes.

Se ha determinado, experimentalmente una relación entre la frecuencia cardiaca en latidos / min y la masa del corazón vaciado de sangre en gramos. Esta relación es:

$$F_c\ (min^{-1}) = 400 / M^{0,3}$$

o bién en términos de la duración del latido cardiaco, en segundos:

$$T\ (s) = 0{,}15 \times M^{0,3}$$

En la tabla II se presenta la frecuencia cardiaca tipica de diversos animales. El lector debe completar las columnas correspondientes al promedio de vida y al número de latidos totales durante toda la existencia, con el objeto de comprobar si se cumple o no aproximadamente que:

$$N \text{ totales de latidos} = F_c \cdot (\text{promedio de vida}) = \text{constante}.$$

Tabla II

Frecuencia cardiaca de algunos animales

Modificado de Ref. [15]

ANIMAL	*Fc (LAT/MIN)*	*PROMEDIO DE VIDA años (min)*	*NÚMERO DE LATIDOS*
Musaraña menuda	700		
Gato doméstico	120		
Hombre	72	80 ($42 \cdot 10^6$)	$3 \cdot 10^9$
Elefante	37		
Ballena	18		
Buey	48		
Cerdo	70		
Perro	115		
Ratón	550		
Colibri	1.000		
Rana	40		

Los animales pequeños también respiran más rápidamente que los grandes, los sonidos que emiten son más agudos y sus alas o miembros se mueven con mayor frecuencia. El consumo de alimentos es más elevado en los animales pequeños en proporción a su peso corporal, su tasa de reproducción es más alta y su longevidad es menor. Según D'Arcy Thompson esto se debe a que una fibra muscular más corta, ya sea cardiaca, pulmonar, alar o perteneciente a las cuerdas vocales se contrae con mayor rapidez que otra mas grande (por lo cual el tiempo que tarda en contraerse, es menor y por ende la frecuencia de la contracción es mayor) de la misma forma que una cuerda fina y corta, cuando se hace vibrar, presenta una vibración más rápida que otra gruesa y larga. En términos formales:

$$v_{contracción} = K / L_{fibra}$$

y

$$t_{contracción} = l / v_{contracción} = (l\ L_f / K)$$

donde L_{fibra} es la longitud de la fibra muscular, l es la longitud que se contrae la fibra. La frecuencia con la cual se contrae la fibra es:

$$f_{contracción} = K / l\ L_f$$

Por otra parte, la frecuencia de vibración de una cuerda es:

$$f_{vibración} = (n / 2l)\ (T / \rho)^{1/2}$$

donde n, l, T y ρ es el orden del armónico, la longitud de la cuerda, su tensión y su densidad lineal (masa / longitud), respectivamente.

REFERENCIAS

1. Barnes, G.. (1990). An Experiment on Area-to-Volume Ratios. The Physics Teacher. Septiembre.
2. Benchart, C. (1990). Body size, medullary thickness, and urine concentrating ability in mammals. 27, R-228-388.
3. Cromer, A.(1975). Fisica para las ciencias de la vida. Reverté. España.
4. Dawson, T. (1991). Engineering design of the cardiovascular system of mammal. Englewood Cliff, NJ, Prentice-Hall.
5. Eckert, R., Randall, D. y Agustine, G. (1989). Fisiologia Animal. Mecanismos y Adaptaciones. Interamericana - McGraw-Hill. España.
6. Evans, R. (1990) The Physics of Dinosaurs. The Physics Teacher. Septiembre.
7. Gold, A. (1973). Energy expenditure in animal locomotion. Science. 181, 275-276.
8. Goodwin, B. (1998). Las manchas del leopardo (de la evolución a la complejidad). Tusquets editores. España.
9. Gunther, B. (1975). Dimensional Analysis and Theory of Biological Similarity. Physiological Reviews. 55, 659-699.
10. Haken, H. (1986). Fórmulas de éxito en la naturaleza. Biblioteca Cientifica Salvat. No.40. Salvat. España.
11. Hallett, F., Speight, P., Stinson, R. (1977). Introductory Biophysics. John Willey and sons.
12. Hildebrand, M. The mechanics of horse legs. American Scientist. 75, 594-601.
13. Hugon, M. La filosofia de la inmersión. Mundo Cientifico N° 10 Pp. 94-103.
14. Jou, D; Llebot, J. Pérez-Garcia, C. (1986). Fisica para las Ciencias de la vida. Mc Graw-Hill. España.
15. Kane, J. y Sternheim M.(1982). Fisica. Reverté. España.
16. Kleiber, M. (1961). The fire of life. An introdution to animal energetics. Wiley. New York.
17. McMahon, T. (1973). Size and shape in Biology. Science. 179, 1201-1202.
18. Mc Mahon, T. (1975). Using body size to understand the structural design of animals: quadrupedal locomotion. J. of Applied Physiology. 39, 619-627.
19. Trotter, D., McNeill, R. Dinosaurios a la carrera. Investigación y Ciencia. 1991.
20. McNeill, A. (1971). Size and shape. The Institute of Biology. Studies in Biology. N°. 29. William Clones and sons. Gran Bretaña.
21. Pedley, T. (1977). Scale, effects in animal locomotion. Academic Press. London and New York.
22. Richardson, I., Neergaard, E.(1972). Physics for Biology and Medicine. Wiley-Intersciencie.
23. Rodman, P. y McHenry, H.(1980). Bioenergetics and the origin of hominid bipedalism. American Journal of physical anthropology. 52, 103-106.
24. Rosen, R. (1972). Morphogenesis. Cap.1. En: Rosen, R.(ed). Foundations of Mathematical Biology. Vol II. Celullar Systems. Academic Press.
25. Rosen, R. (1973) Cap. 28: the principle of adequate design. En: Rosen, R. (ed). Foundations of mathematical Biology. Vol. III. Supercellular systems. Academic Press EUA.
26. Stevens, P. (1986). Patrones y Pautas en la Naturaleza. Biblioteca Cientifica Salvat. No. 55. Salvat. España.
27. Vogel, S.(2000). Ancas y Palancas Mecánicas. Mecánica Natural y Mecánica Humana. Tusquets editores. España.

PROBLEMAS

1. Una célula esférica de radio R' = 10 micras se divide en dos células hijas iguales de radio R 4 micras cada una de ellas. Asumiendo que la masa se conserva (y si además la densidad de la célula madre y de la célula hija son iguales, entonces el volumen también se conserva) Halle:

   a) El factor de escala (L = R'/R).

   b) ¿Cuál es el cociente del área superficial de la dos células hijas entre el área superficial de la célula madre?.

   c) Si el factor de viabilidad se define como:

   v = oferta de oxigeno (ml/min)/demanda oxigeno (ml/min)

   y es uno para la célula madre. ¿Cuál es el factor de viabilidad de cada célula hija?

   d) Tomando en cuenta el resultado anterior la célula madre puede morir (factor de viabilidad menor que uno) o dividirse, dejar de crecer, o desarrollar invaginaciones y/o prolongaciones. Discuta cada una de las alternativas.

   e) Si el crecimiento de una célula puede ser escrito como:

   dM/dt = oferta de oxigeno-demanda de oxigeno

   ¿Qué forma adopta esta expresión para una célula esférica?

2. Defina:

   a) Factor de escala

   b) Semejanza (isometria).

   c) No semejanza (alometria entre dos individuos)

3. Deduzca la dependencia de la tasa metabólica, frecuencia cardiaca, frecuencia respiratoria y calor producido en condiciones basales con la masa del mamifero en condiciones:

   a) de semejanza (isometria)

   b) no semejanza (alometria)

4. Demuestre que si dos paralelepipedos son semejantes, se cumple que:

G: grande

$AG/AP = L^2$ y $VG/VP = L^3$ P: pequeño

donde L es el factor de escala. Si L = 2, calcule dichos cocientes.

5. Demuestre que dos cubos y dos esferas (grande y pequeña) siempre son semejantes y se cumple que :

   $AG/AP = L^2$; $VG/VP = L^3$

   Calcule el valor de dichas relaciones cuando L = 2.

6. Demuestre que si dos cilindros son semejantes (por ejemplo, dos mamiferos semejantes) se cumple que:

   A transversal G/A transversal P = L^2

   A lateral G/A lateral P = L^2

   y

   $VG/VP = L^3$

   Calcule el valor de dichas relaciones cuando L = 2.

   Demuestre que las mismas relaciones se mantienen cuando se comparan las áreas totales.

7. Demuestre que si dos cilindros no son semejantes (por ejemplo, dos mamiferos no semejantes) entonces, se cumple, definiendo los factores de escala L_1 y L_2) que:

   A transversal G/A transversal P= L^2_2

   Alateral G/Alateral P = $L_2.L_1$

   $VG/VP = L^2_2 . L_1$

donde:

L_1 = altura G/altura P

y

L_2 = radio G/ radio P

Calcule dichos cocientes si $L_1 = 2$ y $L_2 = 3$.

8. Establezca las definiciones de los términos oferta, demanda y consumo de oxigeno (o de energía) de un especimen. ¿Qué relación existe entre ellos?

9. Demuestre que si el factor de viabilidad de un especimen se define como:

$$v = \text{oferta de } 0_2 \,/\, \text{demanda de } 0_2$$

entonces se cumple que:

a) $v = (K_1 \cdot \text{área del especimen}) / (K_2 \cdot \text{volumen del especimen})$

$$= K\,(\text{área} / \text{volumen}) \text{ donde } K = K_1 / K_2$$

b) v grande = v pequeña / L

donde L es el factor de escala y tienen un valor de 3. Calcule b).

10. Demuestre que una célula esférica es viable ($v \geq 1$) si su radio cumple con $R \leq 3K$.

11. Demuestre que dos hormigas semejantes (una gigante y una normal) y de la misma densidad cumplen con:

a) Peso de la hormiga gigante / Peso de la hormiga normal = L^3

donde L es el factor de escala h'/h

b) Peso que la hormiga gigante puede levantar/ Peso que la hormiga normal puede levantar = L^2

¿Quién es más fuerte entre las dos hormigas?

c) Demuestre que:

$$Frhg = \left(\frac{1}{L}\right) Frhn$$

donde Fr es de la fortaleza relativa de la hormiga ¿Quién tiene mayor fortaleza relativa entre las dos hormigas?

d) Suponiendo que la fortaleza relativa de una hormiga normal es 3 y la de un hombre normal es 0,5;

d.1) ¿Quién tiene mayor fortaleza, considerando cada uno en su escala natural?

d.2) Si la altura de un hombre normal es 173 cm y la de una hormiga normal es 1,2 cm. ¿Cuánto vale la fortaleza relativa de una hormiga del tamaño del hombre (hormiga gigante)? ¿Es posible tal especimen? ¿Cuánto vale la fortaleza relativa de un hombre del tamaño de una hormiga (hombre enano)? ¿Es posible tal especimen?

d.3) ¿Cuánto valen los cocientes?:

Fr hombre normal / Fr hormiga gigante y Fr hombre enano / Fr hormiga normal. ¿Quien tiene mayor fortaleza, cuando ambos estan en la misma escala?

12. Demuestre que la máxima altura (h) que una columna cilíndrica uniforme de radio R puede alcanzar sin que se doble (flexione) es (primera ley de Kleiber):

$$h_{max} = A\, r^{2/3}$$

donde A depende de la especie que se considere.

¿Qué implicaciones tiene esta ley en vegetales y animales?

13. Utilizando la expresión anterior demuestre que la tasa metabólica basal (demanda metabólica basal) para los mamíferos (suponiendo no semejanza) se puede escribir como (segunda ley de Kleiber):

$$TMB = (dE/dt)_{basal} = C \cdot M^{3/4}$$

C: constante para los mamíferos

14. Demuestre que la siguiente tabla es correcta:

Tipo de simetría	*Oferta de oxígeno*	*Demanda de oxígeno*	*Frecuencia cardiaca*
SEMEJANZA	$M^{2/3}$	$M^{2/3}$	$M^{-1/3}$
NO SEMEJANZA	$M^{5/8}$	$M^{3/4}$	$M^{-1/4}$

15. Comparando la Tasa Metabólica (TM) de una colectividad de bacterias esféricas de 10 mm de diámetro con el de una colectividad de igual numero, pero de 20 mm de diámetro, se observa que el del

primero es de 4 Kcal/día mientras que el del segundo es de 16 Kcal/día. Tomando en cuenta este hecho experimental, determine si la ley de escala de la tasa metabólica de este tipo de bacteria es función de la masa de la bacteria ($TM \propto M_{bacteria}$) o de su área ($TM \propto Area \propto M^{2/3}$).

16. Luego del éxito de la NASA en la fabricación de equipos ultralivia-nos para uso en vuelos espaciales, en los cuales el peso de los equipos es crítico, surgió la necesidad de resolver el problema del peso de los astronautas, el único que no ha podido ser miniaturizado. En el supuesto de que mediante algún proceso, aún desconocido, se pudiera procrear un ser humano de reducidas dimensiones tal que su peso fuera de 3 kg y considerando como modelo semejante a un individuo de 1,8 m de estatura y 81 kg de peso, responda a las siguientes preguntas:

a) Si el pequeño astronauta debe ser semejante al modelo, ¿cuál sería su estatura?

b) Si el fémur del modelo tiene una longitud de 36 cm, ¿cuál será la longitud del fémur del hombrecito?

c) Calcular el cociente de la fortaleza relativa del hombrecito respecto al modelo. Suponga $F_{RM} = 0,5$.

d) ¿En qué proporción se reduciría la cantidad de alimento que debe ser transportado?

17. Una mujer de 1,55 metros de altura, pesa 50 kg. ¿Cuánto pesaría una mujer de 1,70 metros y forma semejante?

18. Los mamíferos terrestres varían de tamaño desde la musaraña enana (2 pulgadas de largo) al elefante de la India (130 pulgadas). Discutir los factores que impiden que los mamíferos sean apreciablemente más grande o más pequeños que éstos.

19. El valor reportado en reposo por Ganong (Fisiología Médica, 14ª edición) para el flujo sanguíneo de una masa de músculo esquelético de 31 Kg es de 840 ml / min lo cual representa el 15,6 % del gasto cardíaco (5,4 lit/min). Por otra parte, el flujo sanguíneo para 100 gramos de tejido expresado en ml/min es 2,7.

a) ¿Cuál es la probable ley de escala para el flujo sanguíneo cuando un mismo órgano disminuye su tamaño desde 31 kg a 100 g?

b) Suponiendo que la presión arterial media que perfunde a un órgano grande y a otro pequeño es la misma, ¿Cuál es la ley de escala para la resistencia hemodinámica?. Los valores reportados por Ganong (obra citada) son 6,4 URP (mm de Hg/ml/seg) para una masa muscular esquelética de 31 Kg y de 198,4 URP para 1 Kg de órgano ¿Se cumple la ley de escala que usted encontró?

20. Demuestre que para animales semejantes: (a) la velocidad de la carrera no depende del factor de escala. (b) la velocidad al caminar (marcha) depende L, donde L es el factor de escala. (c) ¿Qué condiciones debe poseer la masa de la pata y la longitud de la misma para desarrollar velocidades de carrera grande? (d) En relación a la parte (b), ¿Quién camina más rápido, el individuo grande o el pequeño? (e) Con relación a la parte (b) analice el problema suponiendo que: (i) la extremidad inferior se comporta como un péndulo doble, y (ii) suponga que la pierna es un péndulo físico.

Ayuda: parte (a): considere de acuerdo con el teorema del trabajo y la energía, que:

$$W_{muscular} = F_{musc} \times (\text{distancia que se acorta el músculo})$$
$$= (1/2)\, M_{pata}\, V^2$$

Ayuda: parte (b): considere que la pierna se comporta como un péndulo simple de periodo:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{1}{g}}$$

21. ¿Porqué en los sitios fríos existe una menor probabilidad de encontrar animales pequeños?

22. Dos cilindros, uno macizo de radio r y otro hueco de radio interior igual a la mitad del anterior, están hechos del mismo material, y tienen la misma longitud y masa. Cuando a ellos se les aplica la misma carga, perpendicular al eje longitudinal:

¿Cuál de los dos cilindros presentan la mayor deformación?

¿Qué relación tiene este resultado con el hecho de que los huesos sean huecos?

23. Los animales que viven en el desiero deben atravesar grandes distancias entre las fuentes de agua. Obtenga el tiempo máximo durante el cual un animal es capaz de correr, en función del factor de la escala L.

24. ¿Cómo varia la velocidad de carrera de un animal? (a) en terreno plano. (b) sobre una pendiente.

25. ¿Cómo varia la altura del salto de un animal en función de su tamaño?

26. Dawson, en 1991 sugirió que el gasto cardiaco (en ml/min) es proporcional al peso W (en kg) de un individuo, de acuerdo a la siguiente fórmula: $G_c = 224\ W^{3/4}$ y que la frecuencia cardiaca obedece muy estrechamente a la relación: $f_c = 229W^{-1/4}$. Por consiguiente, el volumen latido obedece a la expresión: $V_L = 0{,}978W$, para un sujeto de 70 kg, calcule G_c, F_c y V_L

TEMAS PARA INVESTIGAR

- ✔ Geometria fractal y crecimiento de estructuras biológicas.
- ✔ Diseño adecuado en Biologia.
- ✔ Desarrollo epigenético.
- ✔ Control óptimo en Biologia.
- ✔ Apoptosis (muerte celular programada).

APÉNDICE 1

Parámetro / *Tipo de simetria*	*Semejantes*	*No semejantes*
Altura (l)	$L \propto M^{1/3}$	$L \propto M^{1/4}$
Radio (r)	$L \propto M^{1/3}$	$L^{3/2} \propto M^{3/8}$
Area transversaL (r^2)	$L^2 \propto M^{2/3}$	$L^3 \propto M^{3/4}$
Area Lateral (rl)	$L^2 \propto M^{2/3}$	$L^{3/2} \cdot L = L^{5/2} \propto M^{5/8}$
Volumen o masa (r^2l)	$L^2 \cdot L = L^3 \propto M$	$L^3 \cdot L = L^4 \propto M$
Potencia muscular, Tasa metabólica	$L^2 \propto M^{2/3}$	$L^3 \propto M^{3/4}$
Energia metabólica, consumo de oxigeno, calor producido	$L^3 \propto M$	$L^4 \propto M$
Oferta de oxigeno, calor disipado	$L^2 \propto M^{2/3}$	$L^{5/2} \propto M^{5/8}$
Trabajo realizado (Fm • s)	$L^2 \cdot L = L^3 \propto M$	$L^3 \cdot L = L^4 \propto M$
Trabajo requerido (mgs)	$L^3 \cdot L = L^4 \propto M^{4/3}$	$L^4 \cdot L = L^5 \propto M^{5/4}$
Velocidad de carrera	1 (invariante)	1 (invariante)
Velocidad de la marcha	$L^{1/2} \propto M^{1/6}$	$L^{1/2} \propto M^{1/8}$
Velocidad de acortamiento	1 (invariante)	1 (invariante)
Tiempo de inmersión		
Consumo de oxigeno	$L \propto M^{1/3}$	$L \propto M^{1/4}$

L = altura animal grande / altura del animal pequeño

$$L = l'/l \ ; \quad l \ \alpha r^{2/3}$$

$$L^* = r'/r \ ; \quad L = (L^*)^{2/3}$$

MUY INTERESANTE

VELOCIDAD DE ARRANQUE Y VELOCIDAD SOSTENIDA

Las vías metabólicas que regeneran ATP no son iguales en todos los músculos sino que existen especializaciones funcionales y bioquímicas que le permiten a diferentes tipos de músculos adaptar sus vías de producción de energía a necesidades funcionales específicas. Estas diferencias se pueden comprender examinando los requerimientos fisiológicos de diferentes tipos de músculos y como ellos operan en dos mamíferos de orejas largas, el conejo y la liebre. La descripción siguiente es válida para conejos europeos, pero no para los americanos.

Los conejos europeos viven en madrigueras de las cuales salen sólo para moverse una corta distancia en la búsqueda de alimentos y aventuras. Estos animales confían en su velocidad de arranque para regresar a su madriguera y así escapar de sus depredadores (lobos, zorros, etc.) Tienen la habilidad de acelerar repentinamente en cortas distancias y de esa manera sobreviven. Aunque son excelentes «sprinters» los conejos son pobres corredores de distancia, ellos se cansan rápidamente.

Muchas especies de liebres europeas, por otro lado no tienen madriguera fija y modifican mucho su hábitat. Esas liebres son excelentes corredores de distancia confiándose en su potencia sostenida para escapar de sus perseguidores. El trayecto de las liebres se conoce desde la antigüedad.

Al comienzo del siglo XX se aclaró para los científicos (aunque esta información debió ser ya conocida por cazadores y cocineros) que los músculos usados para la locomoción por conejos y liebres difieren en color, en el conejo son rosado pálido, casi blancos,

mientras que los músculos de la espalda y extremidades de la liebre son de color rojo intenso. Relaciones similares entre el color del músculo y la función se encuentran en otras especies de vertebrados, es decir, el músculo blanco se encuentra generalmente cuando se necesitan arranques cortos de actividad intensa, mientras que los músculos rojos se encuentran donde la actividad es sostenida. En la experiencia culinaria común por ejemplo, la pechuga de pollo, que impulsa las alas que se usan solo intermitentemente es carne blanca mientras que las extremidades de pollo (que son carne oscura) representan músculos que se usan de forma más continua para caminar alrededor del corral.

En los pájaros capaces de vuelos sostenidos, los músculos de la pechuga son rojos (por ejemplo, la carne roja oscura del pato y del ganso).

Fuente: Traducido de A. Katz, p. 43/44. Phisiology of the Heart. Lippincott Williams and Wilkins. 2001. USA.

Nota de los Autores:

Los felinos en general se caracterizan por ser buenos «sprinters», utilizando la sorpresa para capturar a sus presas. Sin embargo, el guepardo o chita, un felino oriundo de Africa y Asia, posee una de las más altas velocidades sostenidas (entre 80 y 100 Km/h), pero cada cierto tiempo debe parar su carrera porque la tasa de calor producida durante ella es tan alta que los mecanismos para disipar tal calor fallan. De no parar, el guepardo se sobrecalentaría lo cual produciría daños graves en su organismo, incluso la muerte.

Capítulo III

Estudio de la bioelectricidad

1. INTRODUCCION

Antes de comenzar el estudio de la bioelectricidad, debemos entender claramente cuál es el rol de la electricidad en el campo de la Biologia y la Medicina, y por ende en la Biofisica y la Bioingenieria.

Como planteamos en anterior oportunidad, los sistemas biológicos, en su aparición y evolución obedecen todas las leyes de la Fisica. Es decir, las leyes naturales determinan la forma cómo la materia inanimada evolucionó hasta la aparición de la vida y posteriormente determinan parcialmente cómo los sistemas vivos evolucionan hacia formas superiores.

Estas "leyes fisicas o naturales" no son más que expresiones cuantitativas de las diferentes formas en que la materia interactúa. Una de estas interacciones son las denominadas interacciones "electromagnéticas" tales como las fuerzas eléctricas y las magnéticas. Sin embargo, en Biologia, las interacciones magnéticas han sido poco estudiadas, prevaleciendo por tanto el estudio de las interacciones eléctricas. Como veremos más adelante, las células vivas son sistemas fisico-quimicos capaces de transformar otras formas de energia en energia eléctrica, son por lo tanto generadoras de "bioelectricidad".

Asi pues, un objetivo fundamental del estudio de la electricidad dentro de la Biologia, es investigar tanto el origen de los fenómenos bioeléctricos como sus manifestaciones. Además, para el estudio de estos fenómenos se requiere de modernas técnicas, muchas de ellas basadas en la electricidad y en la electrónica. Por otra parte, los avances de la bioingenieria han llevado al desarrollo de gran número de dispositivos eléctricos, electromecánicos y electrónicos de uso hoy común en

medicina. En resumen podemos decir que el estudio de la electricidad en la Biologia y la Medicina tiene dos vertientes:

Estudio de la electricidad en Biología { **Bioelectricidad** / **Bioelectrónica**

Cuando estudiamos la vertiente "Bioelectricidad", estamos interesados en el origen y manifestación de los fenómenos eléctricos en los organismos vivos. Cuando tomamos la vertiente "Bioelectrónica", nos interesa averiguar la forma como estos fenómenos son registrados y analizados utilizando para ello técnicas fundamentalmente electrónicas. Cada una de estas vertientes está caracterizada por la forma como es conducida la corriente eléctrica; en los organismos vivos, la conducción de corriente es de naturaleza iónica, mientras en los medios metálicos la conducción es de naturaleza electrónica. Esta situación la podemos representar mediante el siguiente diagrama:

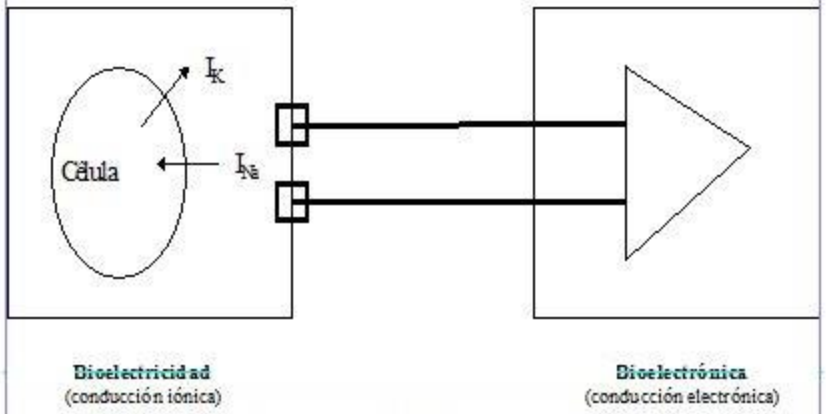
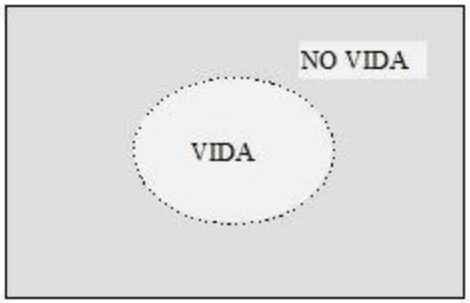


Fig. 1: Conversión de una señal bioeléctrica en una señal electrónica.

Por ahora, concentraremos nuestro estudio en la Bioelectricidad y siendo la célula la fuente de todo potencial eléctrico de tipo biológico, y en general de todos los procesos bioeléctricos que caracterizan la vida, debemos entender cada uno de los fenómenos físicos y químicos que nos permitan comprender los procesos que ocurren en la primera parte de la figura anterior.

2. ORIGEN DE LOS POTENCIALES BIOELÉCTRICOS



Toda célula, animal o vegetal, se caracteriza por tener una membrana selectivamente permeable que demarca el límite de separación entre su estructura interna y el medio que la rodea (siempre líquido).

Tanto el interior de la célula, como el medio ambiente que la rodea, son soluciones electrolíticas y el sistema se caracteriza por el hecho de que en el interior de la célula se acumula potasio, mientras en el medio externo, el ión prevaleciente es el sodio. Es decir,

$$\left.\begin{array}{l}[K^+]_{in} > [K^+]_{ex} \\ [Na^+]_{in} < [Na^+]_{ex}\end{array}\right\}$$ **Distribución asimétrica de iones**

Si estas concentraciones se igualaran, representaría la muerte de la célula. Ahora bien, esta asimetría iónica da origen a un potencial bioeléctrico, el denominado "Potencial de Membrana". En general, cuando dos soluciones electrolíticas se encuentran separadas por una barrera semipermeable (membrana, película, restricción, etc.), se establece un potencial electroquímico, el cual estudiaremos más adelante. Por lo anteriormente planteado, todas las células vivas se encuentran polarizadas de forma tal que su interior es negativo con respecto al exterior. Esta polarización que manifiestan todas las células, es usada en menor o mayor grado de acuerdo al tipo y función de la célula en el organismo. Las células denominadas "no excitables", utilizan en menor grado esta energía acumulada, por ejemplo las células epiteliales u óseas. Sin embargo, las células "excitables" (neuronas, fibras musculares, órganos receptores,

etc.) utilizan esta energía eléctrica en mayor grado, especialmente como un medio de comunicación y coordinación intercelular.[1]

Si mediante un sistema adecuado de registro eléctrico intracelular, observáramos el potencial de membrana de una célula no excitable, nos percataríamos que dicho potencial no cambia en forma apreciable en el tiempo. (Ver fig. 2).

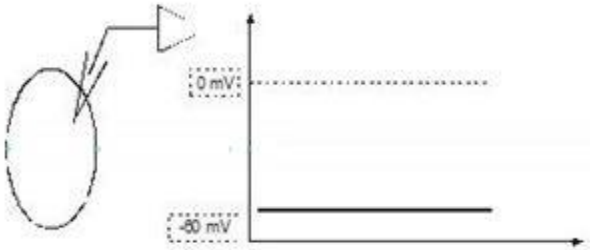


Fig. 2: Potencial de reposo de una membrana celular.

Si por el contrario, observáramos una célula excitable, nos percataríamos que este potencial de membrana cambia de acuerdo con el nivel de actividad de la célula. (Ver fig. 3).

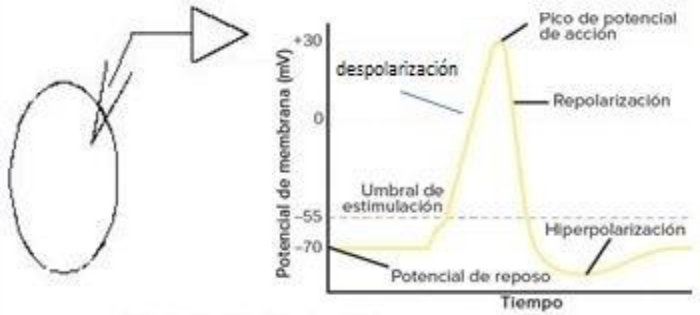


Fig. 3: Cambio del potencial de una membrana celular.

1. Algunos organelos especializados, como las mitocondrias, utilizan esta energía para realizar funciones fundamentales.

3. ROL DE LA ELECTRICIDAD EN LA COMUNICACIÓN INTERCELULAR

Como mencionamos anteriormente, la función primordial de la actividad eléctrica en los organismos es la de comunicación y coordinación intercelular. Por definición, comunicar es transmitir información, y en general este proceso requiere de un medio de comunicación y de una fuente de energía, la cual, al codificarse o modularse genera un código con significado que es la información. (Ver fig. 4).

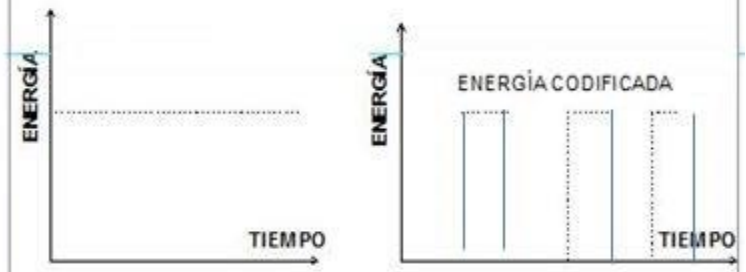


Fig. 4: Codificación de la energía en forma de pulsos.

Si nos planteamos el problema de la comunicación intercelular, y nos percatamos que las células son "máquinas químicas" y que por tanto sólo pueden producir sustancias químicas, debemos concluir que el sistema básico de comunicación intercelular debe realizarse mediante la producción de una molécula específica por una célula A, la cual libera dicha sustancia al medio, en el cual difunde, y una célula B debe haber desarrollado un receptor específico para esta molécula "mensajera". (Ver fig. 5).

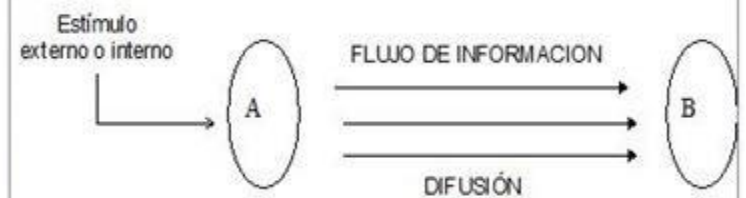


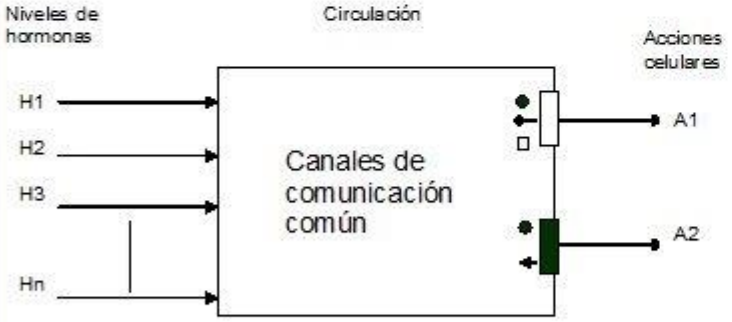
Fig. 5: Comunicación entre dos células A y B.

Otra manera de interpretar la comunicación intercelular es como una fuente de información (célula mensajera) que envía un mensaje codificado (señal), a través de un canal de comunicación (axón, sangre, líquido intersticial, etc.), que finalmente será decodificado al ser recibido por la célula destinataria.

Fuente: J. Houk. Control strategies in physiological systems. *FASEB J* 1988 2: 97-107.

La comunicación intercelular se divide en tres tipos fundamentales: a) Hormonal; b) Neurohormonal y c) Neural. Existen otras formas comunicación intercelular, como por ejemplo, la autocrina y la paracrina que no discutiremos en este trabajo.

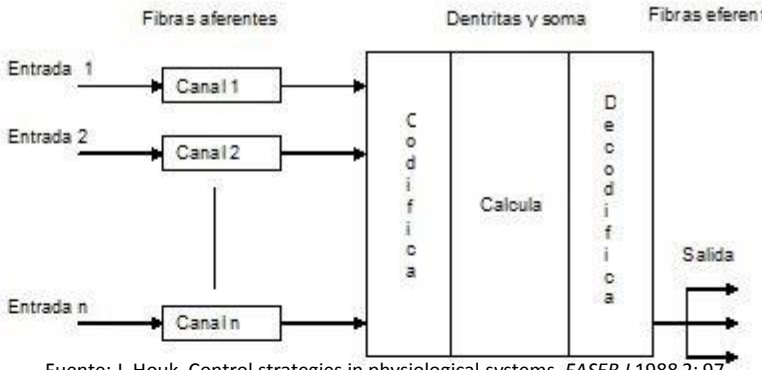
Comunicación endocrina



Fuente: J. Houk. Control strategies in physiological systems. *FASEB J* 1988 2: 97-107.

La comunicación intercelular opera en diversas escalas de tiempo y sus efectos pueden manifestarse desde milisegundos hasta años. Por ejemplo, los procesos que ocurren durante la maduración del organismo, como es el paso de la niñez a la pubertad, constituyen una serie de cambios originados por la acción hormonal continua que se manifiesta finalmente en un cambio cualitativo del sujeto en esta etapa de la vida.

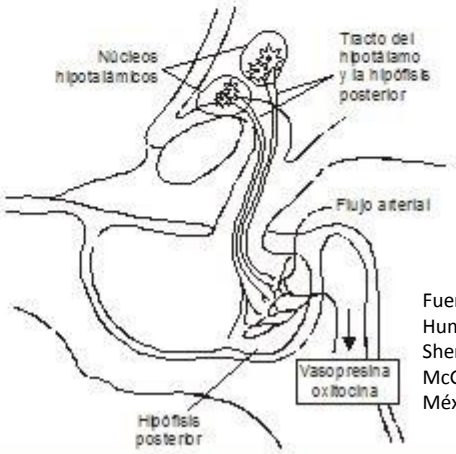
Comunicación neural



Fuente: J. Houk. Control strategies in physiological systems. *FASEB J* 1988 2: 97-107.

Un efecto a mediano plazo de la acción hormonal lo constituye la ovulación, la cual se produce aproximadamente cada 28 días.

Entre los efectos a corto plazo de la acción hormonal se encuentran el del cortisol y de las catecolaminas (adrenalina y noradrenalina), secretadas por la corteza y médula suprarrenal, respectivamente. Estas hormonas son secretadas en casos de estrés físico importante como el ejercicio intenso, hipotensión o shock, entre otras, donde su acción es requerida de una manera inmediata.



Fuente: Fisiología Humana. A .Vander, J. Sherman, D. Luciano. McGraw-Hill. México.1978.

MUY INTERESANTE

COMUNICACIÓN NEURO-HORMONAL

RELACIONES ENTRE EL HIPOTÁLAMO Y LA HIPÓFISIS POSTERIOR

Un ejemplo de comunicacion neuro-hormonal es el mecanismo mediante el cual las hormonas oxitocina y antidiurética (vasopresina) sintetizadas por las neuronas hipotalámicas, almacenadas luego en forma de vesiculas y transportadas a través de los axones nerviosos se liberan finalmente en los capilares de la hipófisis posterior (neurohipófisis) como respuesta a la generación de un potencial de acción del nervio. La oxitocina y la hormona antidiurética son responsables de la contracción uterina y secreción láctea, la primera, y de la inhibición de la excreción urinaria en casos de restricción hídrica, la segunda.

La comunicación hipotálamo-hipófisis anterior, también es neurohormonal. En el hipotálamo se sintetizan los factores liberadores de hormonas, los cuales son secretados en los capilares hipotalámicos para ser transportados hasta la hipófisis anterior (adenohipófisis), donde ejercen su efecto, que consiste en la liberación por parte de la hipófisis de hormonas estimulantes.

La secreción de las catecolaminas también constituye un ejemplo de comunicación neurohormonal. En este caso la activación del sistema simpático conduce a un incremento de la actividad del nervio esplácnico menor (nervio vasomotor), que inerva a la médula suprarrenal, ésta en respuesta a los estímulos nerviosos libera adrenalina y noradrenalina.

La comunicación neural es la que se realiza en más breve plazo, por ejemplo, la mayoría de los estímulos provenientes del medio exterior o interior de los cuales pueden depender la vida del organismo son procesados inmediatamente. En estos casos la

comunicación se realiza a través del Sistema Nervioso, siendo su elemento constituyente la neurona, la cual actúa como un canal de transmisión de información.

En las neuronas la comunicación es fundamentalmente química en naturaleza, sólo que la liberación de la molécula «mensajera», el neurotransmisor se libera al medio a una distancia muy corta de la célula receptora, aproximadamente a 10 nm de distancia, en sitios especializados denominados sinapsis, mientras la información proveniente de sitios lejanos, se propaga mediante impulsos eléctricos, denominados potenciales de acción. Podemos decir entonces, que la función del Sistema Nervioso es la de adquirir, procesar y transmitir información, la cual se realiza fundamentalmente manejando adecuadamente la bioelectricidad.

Por lo visto anteriormente, en el estudio de la bioelectricidad estamos interesados en los denominados fenómenos de excitación, siendo éstos: Potencial de reposo celular, potencial generador, generación y conducción del impulso eléctrico en el nervio (impulso nervioso) y músculo (impulso mioeléctrico), transmisión sináptica y acoplamiento excitación-contracción. Para lo cual debemos responder a las siguientes preguntas: ¿De dónde proviene la energía necesaria para transmitir la información? ¿Cómo se codifica esta información? ¿Cómo se propaga la información? ¿Cómo se transmite de una célula a otra? y finalmente ¿Cómo se mide?

Capítulo IV

Origen de los fenómenos eléctricos

ELECTROSTATICA ORIGEN DE LOS FENOMENOS ELÉCTRICOS

Como es de suponer, el inicio de todo fenómeno eléctrico debe comenzar por el concepto de «carga eléctrica», lo cual está a su vez relacionado intimamente con la estructura de la materia que constituye el Universo. De nuestros estudios de Fisica Básica, sabemos que toda la materia ordinaria del Universo está formada por átomos, los cuales a su vez están constituidos por las denominadas particulas elementales, tales como electrones, neutrones y protones. Los neutrones y los protones constituyen la parte central del átomo, el núcleo, el cual contiene el 99,95 por ciento de la masa del átomo, ocupando, sin embargo, una parte infima del volumen atómico. Los electrones, por su parte, orbitan alrededor del núcleo, y contienen el resto del 0,05 por ciento de la masa atómica, ocupando la mayor parte del volumen que es mayoritariamente vacio. Esta estructura la podemos representar utilizando para ello el modelo de Bohr, representado en la fig. 1.

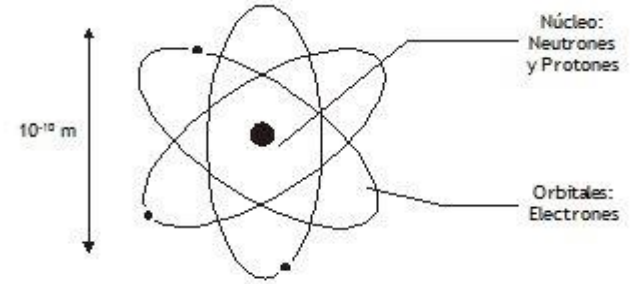


Fig. 1: Modelo de Bohr (modelo planetario) del átomo.

Así, el átomo está compuesto de:

$$\text{Átomo} \begin{cases} \text{Orbitales} \begin{cases} \text{Electrones (-)} \\ \text{Protones (+)} \\ \text{Neutrones (0)} \end{cases} \\ \text{Núcleo} \end{cases} \Bigg\} \text{Quarks } \frac{1}{3}e^{+,-}, \frac{2}{3}e$$

Cada una de estas particulas presentan propiedades que le son caracteristicas y de las cuales dependen el tipo de interacción que se manifiesta entre ellas. Es de observar que la estructura del átomo y por ende de toda la materia, está determinada por la naturaleza de estas interacciones.

Hasta el presente, cuatro interacciones fundamentales son conocidas:

1. Interacciones Gravitacionales
2. Interacciones Electromagnéticas (eléctricas y magnéticas)
3. Interacciones Nucleares fuertes
4. Interacciones Nucleares débiles

Las interacciones gravitacionales son las más débiles de las cuatro y gobiernan fundamentalmente la interacción entre los cuerpos astronómicos, por la gran cantidad de masa que contienen, mientras su efecto en las estructuras atómicas es despreciablemente pequeño. Este nivel es gobernado fundamentalmente por las interacciones electromagnéticas y nucleares. Son las fuerzas electromagnéticas las que mantienen a los electrones en sus órbitas alrededor del núcleo, además de determinar la forma como los diferentes átomos interactúan entre si para formar las moléculas, es decir, gobiernan en última instancia las caracteristicas químicas de las sustancias. Las interacciones eléctricas también son importantes en las células ya que influencian el transporte de iones a través de la membrana, lo que a su vez determina la transmisión de los impulsos nerviosos y la contracción muscular, entre otros fenómenos bioeléctricos. Por su parte, las interacciones-nucleares fuertes y débiles, son importantes sólo a nivel del núcleo de los átomos (considerando también el interior de los nucleones) y su influencia sobre los seres vivos viene dada por las interacciones de las radiaciones con éstos. En definitiva, las

interacciones más importantes en el estudio de la Biología son las interacciones electromagnéticas y gravitacionales, siendo las primeras las que determinan las propiedades físicas y químicas de la materia ordinaria. En forma cuantitativa las interacciones físicas se expresan en forma de ecuaciones matemáticas. A continuación, estudiaremos las ecuaciones que expresan las interacciones gravitacionales y eléctricas.

La interacción gravitacional es producto de la propiedad de las partículas o de los cuerpos de tener masa. El vector fuerza, que representa la interacción gravitacional entre dos masas se expresa por la siguiente ecuación:

$$\vec{F}_g = -G\frac{m_1 m_2}{r^2}\hat{r}$$

Conocida como Ley de Gravitación Universal, donde m_1 y m_2 representan la masa de las partículas o del cuerpo, según el caso, y son siempre cantidades positivas, r^2 es el cuadrado de la distancia que separa las partículas, G es la Constante de la Gravitación Universal y el vector unitario $\hat{r}$ indica la dirección de la interacción. El signo menos (–) delante de la ecuación, expresa que las fuerzas gravitacionales son siempre atractivas. En la siguiente tabla se expresan los valores de las masas de las partículas elementales en reposo[1].

$G = 6{,}673 \times 10^{-11} N \cdot m^2 / Kg^2$	(constante gravitacional)
$m_p = 1{,}6726 \times 10^{-27}$ Kg	(masa del protón)
$m_n = 1.6749 \times 10^{-27}$ Kg	(masa del neutrón)
$m_e = 9{,}1100 \times 10^{-31}$ Kg	(masa del electrón)

Por su parte, las interacciones debido a la propiedad de las partículas de tener carga, viene dada por la fórmula de Coulomb, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\left(\vec{F}_e = K\frac{q_1 q_2}{r^2}\hat{r}\right)$$

(1) De acuerdo con la Teoría de la Relatividad, los cuerpos en movimiento aumentan su masa de acuerdo con la relación de Lorentz $m = m_0/(1-(v/c)^2)$ donde m_0 es la masa en reposo de la partícula, v es su velocidad y c la velocidad de la luz.

donde q_1 y q_2, representan la carga de las partículas expresadas en coulombios (Sistema MKS), las cuales pueden ser positivas (+) o negativas (–), por lo que la interacción puede ser atractiva o repulsiva, r^2 es el cuadrado de la distancia que separa a las partículas, K es la Constante Eléctrica, y el vector unitario $\hat{r}$ indica la dirección de la interacción. Los simbolos utilizados en la fórmula significan:

$K = 8{,}988 \times 10^9\ N \cdot m^2/C^2$	(constante eléctrica)
$e+ = +1{,}602 \times 10^{-19} C$	(carga del protón)
$e- = -1{,}602 \times 10^{-19} C$	(carga del electrón)

La Constante Eléctrica es también convenientemente expresada como: $K = \frac{1}{4} \pi \varepsilon_o$, donde $\varepsilon_o = 8{,}854 \times 10^{-12}\ C^2 / N\ m^2$ es la permitividad eléctrica del vacio.

Cuando la interacción entre las cargas tiene lugar en un medio, la fuerza eléctrica se ve disminuida por las propiedades eléctricas de éste. La fuerza en el medio viene dada por:

$$\vec{F}_e = K' (q_1 q_2 / r^2)\hat{r}$$

donde K' es la constante eléctrica en el medio dieléctrico, la cual podemos expresar como $K' = \frac{1}{4\pi \varepsilon_m}$, donde ε_m se denomina permitividad eléctrica absoluta del medio. Así pues, la intensidad de las interacciones en el medio la podemos expresar como $F' = F / \varepsilon_r$, siendo ε_r la denominada "constante dieléctrica" y viene dada por la relación $\varepsilon_r = \varepsilon_m / \varepsilon_o$. La constante dieléctrica es un número sin dimensiones y es característico de cada material, siendo 1 para el vacio y muy cerca de 1 para el aire, variando entre 2 y 6 para la mayoria de los medios aislantes.

LOS ÁTOMOS DE LA NATURALEZA

Tanto en Biologia como en Biofisica es importante entender, no sólo la estructura interna de los átomos, sino cómo ellos interactúan entre si, puesto que esta interacción determina la formación de las moléculas y en adelante las formas como la materia se va haciendo más compleja hasta dar lugar a la aparición de las células.

En la naturaleza existen muchas clases diferentes de átomos, de los cuales algunos son estables y otros inestables. Este conjunto de átomos diferentes dan lugar a un número menor (112) de elementos químicos (un mismo elemento químico está constituido por todos aquellos átomos con el mismo número de protones, es decir, por todos sus isótopos).

En su estado natural, los átomos son eléctricamente neutros, ya que como vimos anteriormente las fuerzas eléctricas son muy intensas y comúnmente nos encontraremos que cada carga positiva estará neutralizada por una carga negativa. En términos de los átomos, esto implica que contendrá el mismo número de electrones que de protones. Por otra parte, dado que en las reacciones químicas sólo participan los electrones, caracterizaremos a los elementos por su número atómico (Z), el cual viene dado por el número de protones contenidos en el núcleo. Además, ya que casi el 99% de la masa del átomo se encuentra concentrada

TABLA

CONSTANTE DIELÉCTRICA DE ALGUNAS SUSTANCIAS A 20°C

Aire	1,007
Aceite de transformador	2,10
Ácido palmitico	2,30
Ácido linoléico	2,60
Ácido esteárico	2,30
Cera de abeja	2,80
Madera	5,0
Membrana Celular*	6,0
Caseina	6,5
Etanol	24,3
Agua (pura)	80,4

(*) Si la membrana es de axón a 37°C, la constante dieléctrica es de 8. La membrana es permeable al agua, K^+ y Cl^-, pero impermeable a Y^-. Suponga que los volúmenes de ambos compartimientos son iguales.

en el núcleo, también los átomos se caracterizan por su número de masa (A), el cual viene dado por la suma del número de protones y neutrones contenidos en el núcleo. Si además N expresa el número de neutrones, tenemos que:

A = Número de masa = Z + N

Z = Número atómico (= número de protones)

N = Número de neutrones

Los átomos se representan por un simbolo ${}^{A}_{Z}E$, donde E representa a una letra mayúscula o dos letras (en cuyo caso sólo la primera es mayúscula) que identifica al conjunto de átomos que tienen el mismo número Z (isótopos) y que representan diversas manifestaciones de un mismo elemento químico.

Algunos átomos de importancia en nuestro estudio son:

$${}^{1}_{1}H \quad {}^{12}_{6}C \quad {}^{23}_{11}Na \quad {}^{24}_{12}Mg \quad {}^{16}_{8}O \quad {}^{31}_{15}P \quad {}^{39}_{19}K \quad {}^{15}_{7}N \quad {}^{35}_{17}Cl \quad {}^{40}_{20}Ca$$

Como dijimos en anterior oportunidad, los electrones se localizan orbitando alrededor del núcleo, y se distribuyen con cierto orden. Las leyes que determinan la distribución de los electrones alrededor del núcleo provienen de la Mecánica Cuántica, en ésta se establece que un electrón en un átomo está caracterizado por cuatro números cuánticos:

n = Número cuántico principal (1, 2, 3,...), expresa la energia del electrón.

l = Número cuántico orbital o azimutal (simetria de la función de onda): l = 0..n – 1.

m_l = Número cuántico magnético (orientación espacial): $m_l = -l \ldots +l$

s = Espin del electrón (½). Proyección en el eje z: m_s: ± (½).

Por su parte, el Principio de Exclusión de Pauli, establece que dos electrones en un átomo pueden ocupar el mismo estado orbital al mismo tiempo siempre que tengan proyección de espin (m_s) diferentes[2].

(2) En la Mecánica Cuántica se sustituye el concepto de orbital expuesto por Bohr por el de estado cuántico, lo cual indica la probabilidad de encontrar un electrón en un lugar determinado alrededor del núcleo.

La combinación de las dos condiciones anteriores permiten establecer que los electrones en el átomo solo pueden tener ciertos niveles energéticos bien definidos. En una forma práctica y para los fines de este curso, podemos visualizar estos niveles energéticos o estados cuánticos como capas que se numeran en forma secuencial (1, 2, 3, 4..... o equivalentemente L, M, N, O, ...) en sentido de energias crecientes. A su vez, dentro de cada capa existe un número fijo de subcapas (diferentes valores de l:

- Capa N° 1 (K): Contiene una sola subcapa denominada s, (l = 0) que puede alojar dos electrones.
- Capa N° 2 (L): Contiene una subcapa s (l = 0) que, como en el caso anterior puede dar cabida a dos electrones, y otra de nivel superior, llamada p (l = 1) (px, py, pz), en la que pueden alojarse hasta seis electrones.
- Capa N° 3 (M): Contiene una subcapa s, (l = 0) que puede alojar dos electrones, la capa p (l = 1) que aloja seis electrones y la subcapa d (l = 2) que puede alojar hasta diez electrones.

Ya que el número de electrones de un átomo neutro, es igual a la carga positiva del núcleo (número atómico Z), a medida que el número atómico se incrementa a lo largo de la tabla periódica, se van agregando al átomo nuevos electrones, y éstos van ocupando en forma sucesiva las diferentes capas y subcapas.[3]

Podemos resumir lo anteriormente planteado diciendo que en un átomo multielectrónico estos están distribuidos de forma tal que en la primera capa del átomo pueden existir hasta dos electrones, en la segunda hasta ocho, en la tercera hasta dieciocho y en la cuarta hasta treinta y dos, etc. Es decir, un número máximo de electrones igual a $2n^2$ para la capa de nivel n. ¿Qué ocurre con la distribución electrónica a partir de la quinta capa?

Un aspecto importante que debemos notar es que un átomo puede ser eléctricamente neutro, es decir, tener el mismo número de electrones y de protones y sin embargo, ser químicamente inestable, es decir, tiende a reaccionar con otros átomos. Esto ocurre porque un átomo es estable

(3) Existen excepciones a esta regla, ya que hay circunstancias en las cuales comienza a llenarse una capa superior, antes de llenarse todas las subcapas de la capa anterior.

cuando tiene ocupado completamente todos sus orbitales, como es el caso de los gases nobles. Asi pues, la reactividad o estabilidad quimica de un átomo depende de cuantos electrones tiene y como éstos están distribuidos.

Con el fin de ilustrar lo anteriormente planteado, tomemos el caso de los elementos hidrógeno y oxigeno. Si observamos la tabla periódica, el hidrógeno tiene un sólo electrón por lo que le falta un electrón para completar la capacidad de su única capa. Por su parte, el oxigeno cuenta con ocho electrones distribuidos, dos en la primera capa y solo seis en la segunda capa, faltándole por lo tanto dos electrones para completar la capacidad de su última capa (8). Estos dos elementos reaccionan quimicamente, compartiendo sus respectivos electrones, asi dos átomos de hidrógeno se unen a un átomo de oxigeno, formando la molécula de agua, tomando la estructura de la fig. 2:

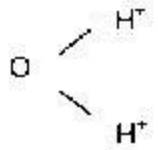


Fig 2: Estructura de la molécula de agua.

Este tipo de enlace quimico se denomina covalente. Por otra parte, la distribución espacial de los electrones da origen a una asimetria de las cargas dando lugar a una estructura polar, ya que el oxigeno al compartir sus dos electrones con el hidrógeno aparenta ganar cargas negativas, mientras cada átomo de hidrógeno aparenta haber ganado una carga positiva. A su vez, las moléculas de agua se unen entre si, mediante enlaces débiles conocidos como puentes de hidrógeno.

Otro tipo de enlaces moleculares, son los denominados enlaces iónicos o electrovalentes. La ley de Coulomb, aunado a lo anteriormente expuesto, nos permite entender la formación de iones en una solución, proceso importante en Biofisica ya que son los iones los transportadores de carga en las soluciones acuosas. Para ello tomemos como ejemplo la combinación del átomo de Sodio (Na) y del Cloro (Cl) para formar la molécula de Cloruro de Sodio (NaCl).

El número atómico del Sodio es once (Z = 11), mientras que el número atómico del Cloro es diez y siete (Z = 17). Por lo tanto, el Sodio tiene distribuidos sus electrones de la siguiente manera: dos en la capa K, ocho en la capa L y uno en la capa M. Para ser estable, él debe ceder este último electrón. Al ocurrir ésto, alcanza la configuracion electrónica del gas noble más cercano a él en la tabla periódica (regla del octeto).

Por su parte, la distribución de los electrones del Cloro es como sigue: dos en la capa K, ocho en la capa L y siete en la capa M (dos en la subcapa s y cinco en la subcapa p). Para ser estable, el Cloro debe ganar un electrón para completar la capacidad de la subcapa p de la capa M. Tenemos asi, que el Sodio cede un electrón quedando cargado positivamente (formando el ión sodio Na^+), mientras que el Cloro gana un electrón quedando cargado negativamente (formando el ión cloro Cl^-). Estamos asi en presencia de dos cargas con signos opuestos, estableciéndose una interacción eléctrica atractiva, cuya magnitud la podemos calcular mediante la ley de Coulomb.

$$Fe_{aire} = Kq_{Na} \cdot q_{Cl} / r^2$$

formándose asi la molécula de Cloruro de Sodio (NaCl).

Cuando los cristales de Cloruro de Sodio son colocados en un solvente como el agua, la permitividad eléctrica del agua disminuye esta fuerza ochenta veces (la constante dieléctrica del agua es 80). Por lo que:

$$Fe_{agua} = \frac{K' q_{Na} q_{Cl}}{r^2} \quad \text{y} \quad Fe_{agua} = Fe_{aire}/\varepsilon_r \text{ con } \varepsilon_r = 80$$

lográndose de esta manera que los iones de Na+ y de Cl^- se separen formando iones libres, es decir, particulas cargadas, que como veremos más adelante, son las responsables de la conducción de la corriente eléctrica en los medios acuosos, tal como ocurre en el organismo.

FORMACIÓN DE CARGAS EN CUERPOS MACROSCÓPICOS

También los cuerpos macroscópicos son capaces de contener carga eléctrica, esto es debido a que en circunstancias especiales y mediante procedimientos adecuados, es posible "arrancar" cargas eléctricas a los átomos que constituyen un cuerpo y trasladarlos a otro. Por ejemplo, si de un cuerpo se extraen electrones y se transponen a otro cuerpo, el primero quedará con exceso de cargas positivas y se dirá que el cuerpo es eléctricamente positivo, mientras que el segundo quedará con exceso de cargas negativas y se dirá que es eléctricamente negativo.

La interacción eléctrica entre ambos cuerpos se puede calcular utilizando la ley de Coulomb, asumiendo que son cargas puntuales.

PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN

Si dos o más cargas (q_1, q_2, ... q_n) actúan sobre una carga q_o, la interacción resultante sobre esta última es la suma vectorial de las interacciones de cada una de las cargas por separado con la carga q_o, es decir:

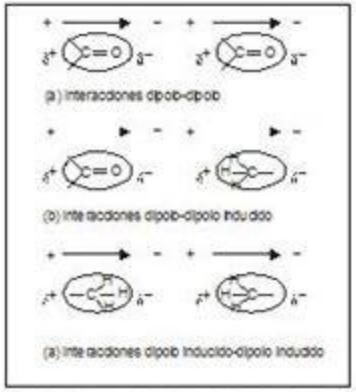
$$\vec{F}_{total} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}i$$

$$\text{con: } \vec{F}_i = K\left(\frac{q\,q_o}{r_{io}^{\,2}}\right)\hat{r}_{io}$$

donde $\hat{r}_{io}$ es un vector unitario en la dirección definida por la linea recta que une a la carga q_i con la q_o, y se aleja de q_i. En caso de estar trabajando en un espacio tridimensional, de cada ecuación obtendremos tres expresiones escalares, una para cada eje cartesiano, por lo tanto si consideramos N cargas, tendremos 3 x N ecuaciones. Si tomamos en cuenta que en los sistemas físicos reales hay millones de particulas, este procedimiento resulta inadecuado para realizar cálculos en sistemas complejos.

MUY INTERESANTE

TABLA DE ENLACES QUIMICOS



Interacciones dipolares. Existen tres tipos de interacciones electrostáticas que implican dipolos. (a) interaccioes dipolo-dipolo. (b) interacciones dipolo-dipolo inducido, y (c) interacciones dipolo inducido-dipolo inducido. La facilidad relativa con la que responden los electrones a un campo eléctrico determina la magnitud de las fuerzas de van der Waals. Las interacciones dipolo-dipolo son las más fuertes y las interacciones dipolo-inducido-dipolo inducido las más débiles.

Tipo de enlace	*Fuerza de enlace*	
	kcal/ mol	*kJ/ mol**
Covalente	>50	>210
No covalente		
Interacciones iónicas**	1–20	4–80
Enlaces de hidrógeno	3–7	12–30
Fuerza de van der Waals	<1-2,7	0,3-9
• Dipolo-dipolo		
• Dipolo-dipolo inducido		
• Dipolo inducido-dipolo inducido (Fuerza de dispersión de London)		
Interacciones hidrófobas	<1-3	3-12

* 1cal= 4,184J.

** La fuerza real varia considerablemente con la identidad de las especies que interactúan.

Fuente: T.McKee, J.McKee. Biochemistry. McGraw-Hill. Third edition. 2004.

Capítulo V

Definición de corriente eléctrica

1. INTRODUCCION

Se define la corriente eléctrica como un flujo de particulas cargadas entre dos regiones del espacio entre las cuales existe una diferencia de potencial. Estas particulas pueden ser electrones y estaremos en presencia de una corriente electrónica, o puede ser iones, y hablaremos de corrientes ionicas.

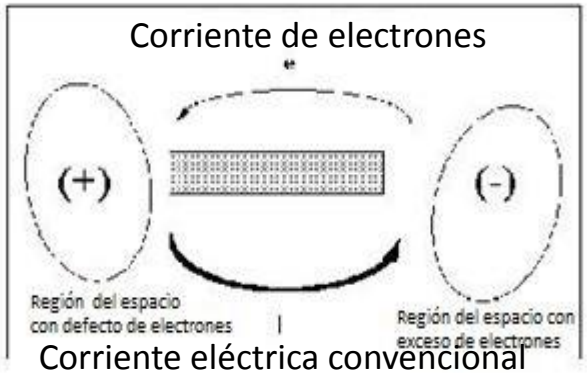


Fig. 1: Relación entre el movimiento de los electrones y la corriente eléctrica.

El tipo de corriente depende entonces del medio o material mediante el cual unamos esas dos regiones del espacio. Imaginemos que utilizamos todos los materiales disponibles para unir estas dos regiones; entonces encontraremos que unos materiales permiten el paso de la corriente con mayor facilidad que otros. Podremos así clasificar los materiales en superconductores, conductores, semiconductores y no conductores o aisladores.

Materiales

- Conductores
  - Metálicos (electrones)
  - Electrolitos (iones)
- Semiconductores
- Aisladores

Sales
Ácidos
Bases

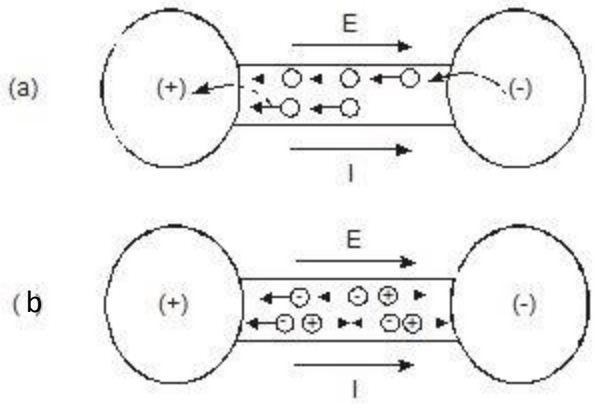


Fig. 2: Conductores metálicos (a) y electrolíticos (b).

2. DEFINICIÓN DE FLUJO Y DENSIDAD DE FLUJO

Como hemos mencionado en párrafos anteriores, una corriente es el flujo de algo que fluye por un lugar. Esto se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$\text{Flujo } (\Phi) = \frac{\text{Cantidad de algo que fluye}}{\text{Unidad de tiempo}} \Rightarrow (\Phi) = \frac{N°}{t}$$

Los flujos pueden ser considerados como continuos o discretos, en el primer caso, se expresan como unidades de volumen por unidad de tiempo y en el segundo, en particulas por unidad de tiempo, es decir:

Flujo

- Continuo (ej.: liquidos) $(\frac{L}{s}, \frac{m^3}{s})$
- Discreto (ej.: particulas) $(\frac{\text{particulas}}{s})$

Por otra parte, se define la densidad de flujo como el flujo por unidad de área, es decir:

$$\text{Densidad de fujo } (\phi) = \frac{\text{Flujo}}{\text{Área}} \Rightarrow (\phi) = \frac{\Phi}{A} \left(\frac{m^3}{s \cdot m^2} = \frac{m}{s}\right)$$

Analicemos con mayor detalle este concepto. Consideremos un conductor en forma tubular por el cual está fluyendo algo en forma discreta, es decir en forma de particulas, tal como se indica en la fig. 3.

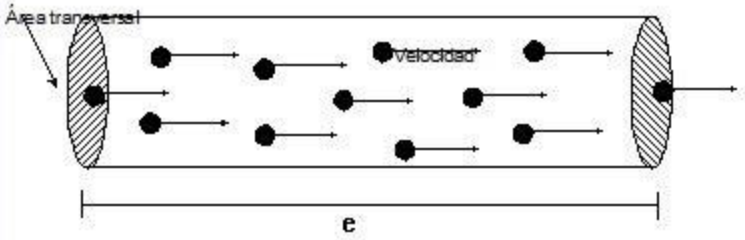


Fig. 3: Flujo de partículas a través de un tubo.

El área transversal del tubo es A (m^2). Además, aunque cada una de las particulas pueden estar moviéndose a velocidades diferentes, con el fin de simplificar la explicación, asumiremos que todas las particulas se están moviendo con una velocidad media rectilínea y uniforme constante para todas ellas, por lo que el espacio recorrido por cada particula en el tiempo t (s) es:

$$e = v \cdot t$$

Veamos ahora que las secciones transversales indicadas en la figura limitan un volumen dado por:

$$V \text{ (volumen)} = e \cdot A = v \cdot t \cdot A \left(\frac{m}{s} \cdot s \cdot m^2 = m^3\right)$$

dado que el número de particulas por unidad de volumen (densidad de particulas) viene dado por la relación:

$$d = \frac{N^0}{V} \Rightarrow N^0 = V \cdot d \ (m^3 \cdot \frac{Part}{m^3}) = Part.$$

Podemos ahora expresar tanto el flujo (Φ), como la densidad de flujo (ϕ) en términos de la densidad de particulas, quedando la expresión de la siguiente forma:

$$\Phi = \frac{N^0}{t} = \frac{V \cdot d}{t} = \frac{v \cdot t \cdot A \cdot d}{t} = A \cdot v \cdot d$$

$$\phi = \frac{\Phi}{A} = \frac{A \cdot v \cdot d}{A} = v \cdot d$$

3. CUANTIFICACIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA:

Se define la corriente eléctrica como el flujo de particulas cargadas con electricidad, dado que la carga eléctrica viene expresada de acuerdo al sistema MKS en unidades de Coulombios, la corriente eléctrica se expresa como:

$$I = \frac{Q}{t} \ (\frac{Coulombios}{s} = Amperios)$$

$$I = \Phi \cdot q_i = (A \cdot v \cdot d) \cdot q_i \ (m^2 \cdot \frac{m}{s} \cdot \frac{1}{m^3} \cdot Coul = Amp)$$

$$j = \frac{I}{A} = \frac{\Phi \cdot q_i}{A} = \phi \cdot q_i = v \cdot d \cdot q_i \ (\frac{m}{s} \cdot \frac{1}{m^3} \cdot Coul = \frac{Amp}{m^2})$$

La tercera ecuación representa a la definición de densidad de corriente, la cual es por definición la cantidad de corriente que pasa por unidad de área.

Hasta ahora nos hemos concretado a definir lo que es el flujo, sin embargo, no hemos dicho nada sobra las causas que producen que algo fluya. Ese algo puede ser de muy variada naturaleza. Por ejemplo, la diferencia de altura entre dos recipientes de agua conectados, produce un flujo o corriente de agua; la diferencia de presión entre dos regiones de la atmósfera (producida a su vez por un gradiente térmico) genera un flujo de aire (viento), la diferencia de temperatura entre dos regiones conectadas por algún medio genera un flujo de calor, la diferencia de presión generada por el corazón en el sistema circulatorio da lugar al flujo de sangre, etc. Como podemos ver de estos ejemplos, para que se produzca un flujo o corriente es necesario que se establezca una diferencia o gradiente entre dos regiones del espacio, por otra parte debe haber un medio o dispositivo que permita el paso de la corriente. De hecho si se restringe el medio conductor la corriente disminuirá, en consecuencia, podemos asi generalizar empiricamente que para que se produzca un flujo al menos necesitamos dos factores, un gradiente y un medio conductor. Este hecho lo podemos expresar matemáticamente mediante la siguiente expresión:

$$f = -k \cdot \nabla\Psi$$

en la cual, el simbolo $\nabla\Psi$ representa el gradiente, el factor k es una constante de proporcionalidad, que como veremos más adelante está relacionada con el medio conductor. Es importante observar que el signo negativo que antecede la ecuación, se debe a la definición matemática de un gradiente, el cual siempre apunta de menor a mayor, mientras el flujo apunta de mayor a menor, es decir en sentido contrario.

Un ejemplo ilustrativo de este fenómeno es la Ley de Ohm, ecuación ampliamente usada en electricidad, la cual establece que la corriente eléctrica en un conductor es proporcional a la diferencia de potencial entre los extremos del conductor, e inversamente proporcional a la resistencia del mismo o directamente proporcional a la conductancia del medio. Su expresión matemática es la siguiente:

$$I \propto \Delta V \begin{cases} I = \frac{1}{R} \cdot \Delta V \Rightarrow R = \frac{\Delta V}{I} \ (\frac{Voltios}{Amperios} = \Omega, \ \textbf{Ohmios}) \\ I = G \cdot \Delta V \Rightarrow G = \frac{I}{\Delta V} \ (\frac{Amperios}{Voltios} = \textbf{S, Siemens}) \end{cases}$$

Tomando en cuenta las caracteristicas del material que constituye el medio conductor, tanto la resistencia y la conductancia se expresan de la siguiente manera:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

- R = Resistencia (Ω)
- L = Longitud del medio
- ρ = Resistividad ($\Omega \cdot m$)
- A = Sección transversal del medio

$$G = \sigma \cdot \frac{A}{L}$$

- G = Conductancia (S)
- σ = Conductividad (S/m)

4. CONDUCTIVIDAD EN MEDIOS ELECTROLÍTICOS:

Cuando un electrólito (ácido, base o sal) es disuelto en agua, por ser el agua un liquido polar, con una constante dieléctrica mayor que la del vacio, hace que las fuerzas que mantienen la estructura de la molécula del electrolito disminuyan, produciéndose su disociación. Se forman así dos iones, uno con carga positiva (catión) y el otro con carga negativa (anión):

$$Na\,Cl \Leftrightarrow Na^+ + Cl^-$$

$$K\,Cl \Leftrightarrow K^+ + Cl^-$$

$$Ca\,Cl_2 \Leftrightarrow Ca^{2+} + 2Cl^-$$

estas cargas libres en el medio acuoso permiten que fluya corriente cuando entre los extremos de la solución hay una diferencia de potencial. Dado que el organismo es fundamentalmente un medio electrolitico por la cantidad de iones disueltos, nos interesa entonces determinar su conductividad.

Con el fin de elaborar un modelo, supongamos la situación representada en la fig. 4.

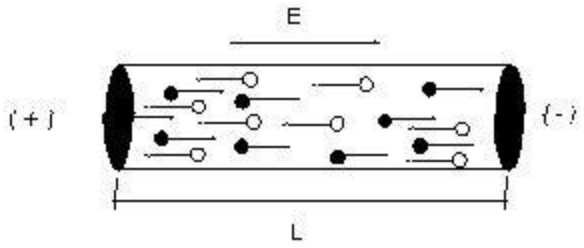


Fig. 4: Flujo de partículas a través de un tubo.

En este modelo, la corriente que fluye por la solución viene dada por la relación:

$$I = G \cdot \Delta V = \frac{\sigma \cdot A}{L} \cdot E \cdot L = \sigma \cdot A \cdot E$$

$$\left.\begin{aligned} j_i &= \frac{I_i}{A} = \sigma_i \cdot E \\ j_i &= v_i \cdot d_i \cdot q_i \end{aligned}\right\} \quad \blacksquare\ \sigma_i \cdot E = v_i \cdot d_i \cdot q_i$$

donde j la densidad de corriente (flujo de cargas) expresada en coulombios/área • tiempo.

En esta expresión, la conductividad de la solución (σ) multiplicada por el campo eléctrico (E) es igual a la velocidad media de las particulas, por la densidad de particulas (d) y por la carga (q_i) de cada una de ellas. Cada uno de estos factores es posible medirlo o expresarlo mediante cantidades conocidas. Por ejemplo, la carga de las particulas no es más que la carga protónica (e^+) multiplicada por la valencia de cada ion (z_i), es decir,

$$q_i = z_i \cdot e^+$$

donde z_i es la valencia y $e^+ = 1{,}6 \times 10^{-19}$ Coul, es la carga protónica fundamental.

Por su parte, la densidad de particulas viene determinada por la concentración de cada una de las especies en la solución. Dicha concentración puede ser expresada mediante cualquiera de las formas usadas comúnmente en fisicoquimica, es decir, en concentración molar, molal o normal. Dado que las concentraciones encontradas normalmente en fisiologia son relativamente bajas, y dado que en estas condiciones la concentración expresada en molalidad y molaridad son prácticamente equivalentes, utilizaremos la concentración molar expresada de la siguiente forma:

$$\begin{cases} C = \dfrac{n}{V(lts)} \; ; \; d = \dfrac{N}{V(m^3)} \; ; \; n = N/N_A \\ \therefore C = \dfrac{N}{N_A \cdot V(m^3) \cdot 1000} = \left(\dfrac{d}{N_A \cdot 1000}\right) \end{cases}$$

Número de Avogrado $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23} \dfrac{\text{Partículas}}{\text{Mol}}$

Sin embargo, dado que en una solución electrolítica no todas las partículas disueltas participan en el flujo de la corriente, ya que cuando aumenta la concentración de una solución, la probabilidad de que dos partículas de cargas contrarias formen momentáneamente una molécula neutra se incrementa. Para tomar en cuenta este hecho físico, se introduce un parámetro denominado actividad (a_i) expresada en iones/m^3, la cual es proporcional a la concentración nominal (c_i). El factor de proporcionalidad es denominado coeficiente de actividad o de disociación (β), cuyo valor varía entre 0 y 1, es decir:

$$a_i = \beta \cdot c_i$$

$$0 \leq \beta \leq 1$$

5. DEFINICIÓN DE MOVILIDAD IÓNICA

Por otra parte, la velocidad media de las partículas no es factible de ser medida, por lo que trataremos de encontrar una expresión que nos permita sustituir esta velocidad por un factor de proporcionalidad. Para ello, introduciremos el parámetro movilidad el cual nos permite establecer una relación entre la velocidad y la acción impulsora, expresada esta última como fuerza o como campo eléctrico.

$$\begin{cases} \vec{V} = u\,\vec{E} \;\text{—}\; |u| = \dfrac{|v|}{|E|} \text{ (movilidad absoluta)} \\ \vec{V} = \mu\,\vec{F} \;\text{—}\; |\mu| = \dfrac{|v|}{|F|} \text{ (movilidad mecánica)} \end{cases}$$

De estas dos expresiones es más conveniente para nuestro fines el uso de la movilidad mecánica dado que esta cantidad es signo-invariante, es decir siempre es positiva, mientras la movilidad absoluta es signo-variante dependiendo si se trata de un anión o un catión. Ver apéndice VII, pág. 147.

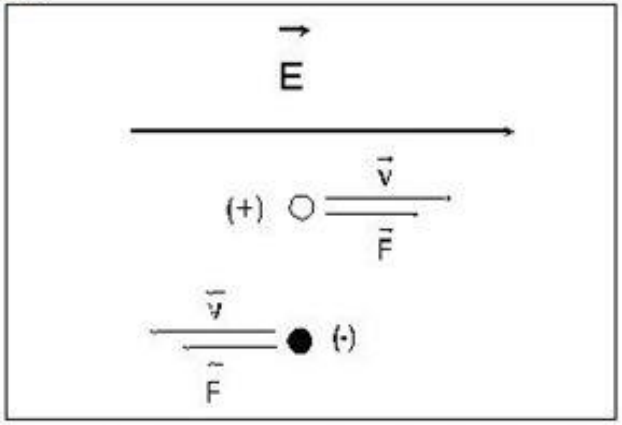


Fig. 5: Movimiento de una carga (positiva y negativa) en presencia de un campo eléctrico.

Como podemos observar en la figura, aunque el vector campo eléctrico (E) permanezca constante, el vector fuerza (F), dado por la relación:

$$\vec{F} = q\ \vec{E}$$

cambiará su sentido dependiendo si la calculamos sobre una carga positiva o sobre una carga negativa. Sin embargo, lo más importante es notar que el vector velocidad y el vector fuerza siempre tienen el mismo sentido, por lo que su cociente es siempre positivo o signo-invariante.

Utilizando las relaciones derivadas anteriormente, podemos expresar la ecuación de la densidad de corriente de la siguiente forma:

$\vec{j_i} = \sigma_i \vec{E}$ y

$\sigma_i = (\mu_i q_i^2 d)$ Ver pág. 147

En la ecuación anterior podemos, dada la proporcionalidad entre la densidad de particulas y la actividad, sustituir la primera por la segunda sin que se altere la ecuación, por lo tanto expresaremos la conductividad de una de las especies iónicas en la solución como:

$$\sigma_i = \mu_i z_i^2 e^2 a_i \left(\frac{\text{Siemens}}{\text{m}}\right)$$

dado que en la solución pueden haber más de dos tipos de iones, y cada especie contribuirá con una fracción de la corriente, la conductividad total de la solución es:

$$\sigma_T = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i$$

para la densidad de flujo de una especie, la expresión es la siguiente:

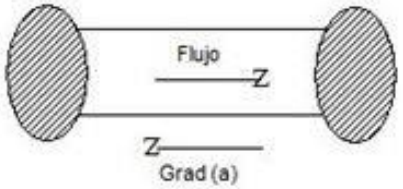
$$\vec{j_i} = \mu_i z_i^2 e^2 a_i \vec{E}$$

siendo la densidad del flujo total:

$$\vec{j_T} = \sum_{i=1}^{n} \vec{j_i}$$

ECUACIÓN DE NERNST-PLANCK

Estamos en capacidad de expresar matemáticamente la relación de Nernst-Planck, la cual no es más que la combinación de los efectos del gradiente químico, el cual tiende a desplazar la particula de donde se encuentra en mayor concentración hacia donde se encuentra en menor concentración, y el gradiente eléctrico, que dependiendo de la carga de la particula, tiende a desplazarla de donde hay mayor potencial eléctrico hacia donde el potencial eléctrico es menor, y en sentido contrario si la carga es negativa. Las densidades de flujo ϕ tienen unidades de particulas (iones)/área • tiempo.

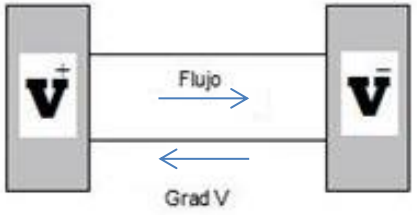


$\phi_{i_q} = -D_i \text{ grad } a_i$ (Ley de Fick)

D_i = Constante de difusión $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

$$\text{grad } a_i = \frac{da_i}{dx}\left(\frac{1}{m^3} \cdot \frac{1}{m} = \frac{1}{m^4}\right)$$

$$\phi_{i_q}\left(\frac{m^2}{s}\frac{1}{m^4} = \frac{1}{m^2 \cdot s}\right)$$



$$\phi_{ie} = \frac{j_i}{z_i e} = \mu_i z_i e a_i E$$

$$\phi_{ie} = -\mu_i z_i e a_i \frac{dV}{dx}$$

Combinando ambos mecanismos, el quimico y el eléctrico, obtendremos un flujo total de cada ión:

$$\phi_{iT} = \phi_{ie} + \phi_{iq}$$

y sustituyendo cada expresión del flujo tendremos para cada ión:

$$\phi_{iT} = -D_i \frac{da_i}{dx} - \mu_i z_i e a_i \frac{dV}{dx}$$

Para transformar esta ecuación y expresarla en una forma más conveniente, usaremos las siguientes relaciones:

$D_i = K\ T\ \mu_i$ Relación de Einstein

k = Constante de Boltzmann = $1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \frac{\text{Joule}}{\text{s}}$

T = Temperatura absoluta = t(°C) + 273

Utilizando las expresiones anteriores podemos expresar la ecuación de Nernst-Planck de la siguiente forma:

$$\phi_{iT} = -\mu_i z_i e a_i \frac{dV}{dx} - k\ T\ \mu_i \frac{da_i}{dx}$$

y para el caso de N especies iónicas tendremos que la densidad de corriente total (coulombios / área • tiempo) es:

$$j_T = \sum_i z_i e \phi_{iT}$$

Esta es una de las relaciones más importantes en la física de los sistemas vivos, ya que nos permite calcular, entre otras cosas, la diferencia de potencial entre el interior y el exterior de la célula, fuente de toda corriente bioeléctrica.

Capítulo VI

Integración de la ecuación de Nernst-Planck

1.ECUACIÓN DE NERNST

Consideremos el caso de una membrana semipermeable que separa dos soluciones que contienen a una sal disociable. Supongamos que la membrana deja pasar a un solo tipo de iones, por ejemplo, a los cationes (ver figura 1).

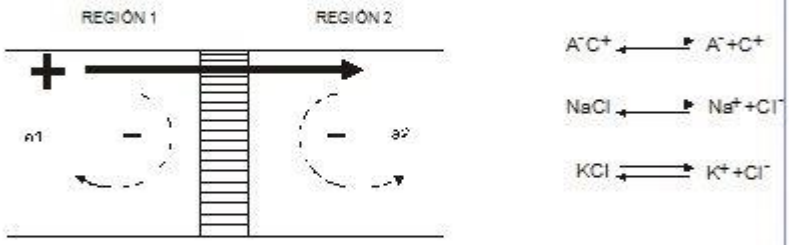


Fig. 1: Dos compartimientos separados por una membrana semipermeable que no deja pasar aniones.

Al principio se establece un flujo de cationes desde la solución más concentrada (región 1) a la menos concentrada (región 2). Luego de transcurrido cierto tiempo se alcanza el equilibrio del ión, es decir su flujo neto es nulo. Esto ocurre porque la solución más concentrada se hace cada vez mas negativa y la menos concentrada mas positiva. Se establece así una diferencia de potencial que impide el paso de más cationes. Equivalentemente, lo que está ocurriendo puede interpretarse en términos de un equilibrio electroquímico, es decir, la igualación del gradiente químico con el eléctrico (o equivalentemente la igualación de la fuerza eléctrica con la química). Si la ecuación de Nernst-Planck para un ión i se iguala a cero y se separan las variables obtenemos:

$$dV = -\frac{kT}{ze}\left(\frac{1}{a}\right)da$$

e integrando entre la región 1 y 2 obtenemos:

$$\int_1^2 dV = -\frac{kT}{ze}\int_1^2 \frac{da}{a}$$

o bien:

$$V_2 - V_1 = -\frac{kT}{ze}\ln\left(\frac{a_2}{a_1}\right)$$

que es la ecuación de Nernst. Haciendo uso de: $R = N_A . k$ y $F = N_A . e$, la ecuación de Nernst presenta la forma:

$$V_2 - V_1 = -\frac{RT}{zF}\ln\left(\frac{a_2}{a_1}\right)$$

con R (constante universal de los gases) = 8,31 J / K.mol y F (la constante de Faraday) igual a 96.320 Coulombios por cada mol de iones monocargados.

Esta diferencia de potencial es negativa, por ejemplo, cuando a_2 es mayor que a_1 y la carga del ión es positiva.

2. Ejemplo: Potencial de equilibrio del potasio

Supongamos que tenemos una membrana celular que es solo permeable al potasio. Las concentraciones del ión en el interior (a_2) y en el exterior celular (a_1) son respectivamente (en el molusco Aplisia), 280 mM y 10 mM, respectivamente.

A la temperatura de 20°C (293 K), el voltaje $V_{int} - V_{ext}$ tiene el valor de –84,21 mV.

2. OTRAS DEDUCCIONES DE LA ECUACIÓN DE NERNST

a) Igualación de trabajos

Supongamos que una pequeña cantidad, Δn moles del ión X^+ que es obligado a moverse a través de la membrana celular desde la región 2 hasta la región 1 (en contra del sentido natural del flujo). Aplicando termodinámica elemental, el trabajo requerido para este movimiento es:

$$\Delta W_c = \Delta n\, RT \ln ([X]_1 / [X]_2)$$

Por otro lado el trabajo eléctrico W_e que se necesita para mover Δn moles desde el compartimiento 1 hasta el 2, en contra de la fuerza eléctrica es:

$$\Delta W_e = \Delta n\, z\, F\, V_{21}$$

donde $V_{21} = V_2 - V_1$. En el equilibrio, no hay flujo neto de X^+ y por esto:

$$\Delta W_c = \Delta We$$

$$\Delta n\ R\ T \ln ([X]_1 / [X]_2) = \Delta n \cdot z \cdot F\, V_{21}$$

o bien:

$$V_{21} = -(RT / zF) \ln ([X]_2 / [X]_1)$$

b) Igualación de los potenciales electroquímicos

El potencial electroquímico representa la energía potencial total que posee un mol de iones debido a su energía eléctrica y a su energía de concentración (energía química). Se puede representar mediante la expresión:

$$\alpha = \alpha^* + RT \ln [X] + zF\, V$$

donde α^* es el potencial electroquímico del ión en el estado estándar (la concentración de lM y 0 K de temperatura, con potencial eléctrico nulo). El segundo término representa al potencial químico y el tercero, representa al potencial eléctrico. El flujo neto del ión ocurrirá desde la región donde el potencial electroquímico es mayor a donde su potencial electroquímico es menor. La tendencia de un ión a moverse

desde el lado 1 hacia el 2 es proporcional a α_1 y en sentido contrario es proporcional a α_2. El flujo neto desde 1 hacia 2 es proporcional a $\Delta\alpha$, con:

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$$

o bien:

$$\Delta\alpha = R\ T\ \ln\ ([X]_1 / [X]_2) + z F\ (V_1 - V_2)$$

Si $\Delta\alpha$ es positivo ocurrirá flujo neto desde 1 hacia 2. Si $\Delta\alpha$ es negativo ocurrirá flujo neto en sentido contrario. Si $\Delta\alpha$ es cero no existe fuerza neta sobre el ión y no hay flujo neto. Esta situación es denominada equilibrio electroquímico a través de la membrana. La diferencia de potencial eléctrico que alcanza la membrana en el equilibrio $(V_2 - V_1)$ será:

$$\Delta\alpha = 0 = R \cdot T \cdot \ln \cdot ([X]_1 / [X]_2) + z F\ (V_1 - V_2) = 0$$

o bien:

$$V_2 - V_1 = -\ (RT / zF)\ \ln\ ([X]_2 / [X]_1)$$

c) Probabilidades relativas

Podemos utilizar la ecuación de Boltzmann de la mecánica estadística que relaciona las probabilidades relativas (poblaciones) de encontrar un ión X en el estado 1 (región 1) o en el estado 2 (región 2):

$$p_2 / p_1 = \exp[-\ (E_2 - E_1)/KT]$$

donde E_1 y E_2 son las energías por ión en cada estado. Por otro lado, el cociente de las poblaciones es proporcional al cociente de las concentraciones:

$$p_2 / p_1 = [X]_2 / [X]_1$$

Así, haciendo uso de la relación $K = R / N_A$, obtenemos:

$$[X]_2 / [X]_1 = \exp\ [-\ (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) / RT]$$

donde $\varepsilon_1 = N_A E_1$ y $\varepsilon_2 = N_A E_2$ son las energías de un mol de iones en cada

uno de los estados. Aplicando la función ln a ambos miembros obtenemos:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = R\ T\ \ln\ ([X]_2 / [X]_1)$$

Además

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = Q\ (V_1 - V_2) = z\ F\ (V_1 - V_2)$$

Igualando ambas expresiones para $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ obtenemos:

$$z\ F\ (V_1 - V_2) = R\ T\ \ln\ ([X]_2 / [X]_1)$$

o bien:

$$V_2 - V_1 = -\ (RT / z\ F)\ \ln\ ([X]_2 / [X]_1)$$

3. ECUACIÓN DE HENDERSON (Ecuación de la movilidad)

Supongamos que tenemos dos compartimientos separados por una membrana semipermeable. En el compartimiento de la izquierda existe una actividad de KCl que es mayor que la existente en el compartimiento de la derecha. La membrana deja pasar ambos iones, el positivo (K^+) y el negativo (Cl^-). Debido a que la movilidad del ión cloro ($\mu = 4{,}94.10^{15}$ cm/s/dinas) es mayor que la del ión potasio ($\mu = 4{,}75.\ 10^{15}$ cm/s/dinas), la solución menos concentrada se hace negativa y la más concentrada se hace positiva. La separación de cargas a ambos lados de la membrana produce un gradiente eléctrico que retarda el movimiento del ión cloro y acelera el movimiento del ión potasio. En el equilibrio, ambos iones se desplazan a la misma velocidad y se cumple que:

$$Z_{Cl}\ \phi_{Cl} + Z_K\ \phi_K = 0$$

y más específicamente:

$$\phi_{Cl} = \phi_K$$

La neutralidad eléctrica de la carga en ambos compartimientos implica que:

$$a_{Cl1} = a_{K1} = a_1$$

$$a_{Cl2} = a_{K2} = a_2$$

Para cada ión se cumple que:

$$\phi_i = -\mu_i (z_i e)\, a_i (dv/dx) - \mu_i KT (da_i/dx)$$

y la igualdad de los flujos tendrá la forma:

$$-\mu_{Cl} (z_{Cl} e)\, a_{Cl} (dv/dx) - \mu_{Cl} KT (da_{Cl}/dx) = -\mu_K (z_K e)\, a_K (dv/dx) - \mu_K KT (da_K/dx)$$

Separando las variables obtenemos:

$$(-\mu_{Cl} z_{Cl} + \mu_K z_K) e\ a (dV/dx) = (-\mu_K + \mu_{Cl}) KT (da/dx)$$

o bien:

$$(-\mu_{Cl} z_{Cl} + \mu_K z_K)\ e\, dV = (-\mu_K + \mu_{Cl}) KT (da/a)$$

cuya integración:

$$\int_1^2 dV = \frac{KT}{e}\left(\frac{\mu_{Cl} - \mu_K}{\mu_{Cl} + \mu_K}\right)\int_1^2 d \ln a$$

arroja como resultado final:

$$V_2 - V_1 = (KT/e)(\mu_{Cl} - \mu_K)\ \ln (a_2/a_1) / (\mu_{Cl} + \mu_K)$$

que es la ecuación de Henderson o de la difusión-movilidad. Si la movilidad del cloro es mayor que la del potasio y además la actividad en el compartimiento 1 es mayor que la del compartimiento 2, entonces $V_2 - V_1$ es negativo. Si las movilidades de los dos iones son las mismas, la diferencia de potencial es nula, este hecho es utilizado en la construcción de microelectrodos de pipeta utilizados en electrofisiologia.

Si la movilidad de uno de los iones es nula, la ecuación de difusión se transforma en la ecuación de Nernst para el ión restante.

4. ECUACIÓN DE GOLDMAN, HODGKIN Y KATZ

Para obtener esta ecuación se debe suponer que el vector campo eléctrico dentro de la barrera (membrana celular) es uniforme y constante. La fig. 2 representa la forma como varian la magnitud del campo eléctrico, el potencial y la carga eléctrica a lo largo de la membrana celular cuyo espesor es δ. Supongamos que la membrana es permeable a los iones Na^+, K^+ y Cl^-. Designemos la densidad de flujo (iones / m^2 s) de cada uno de esos iones con ϕ_i. Este vendrá expresado por:

$$\phi_i = -\mu_i (z_i e)\, a_i (dV/dx) - \mu_i KT (da_i/dx)$$

Si hacemos uso de la relación de Einstein:

$$\mu_i = D_i / KT$$

entonces:

$$\phi_i = -(D_i/KT)(z_i e)\, a_i (dV/dx) - D_i (da_i/dx)$$

y sacando factor común D_i obtenemos:

$$\phi_i = -D_i [(1/RT)(z_i F)\, a_i (dV/dx) + (da_i/dx)]$$

donde hemos usado $K = R / N_A$

Cada uno de los iones considerados cumple la última ecuación:

$$\phi_K = -D_K [(1/RT) F\, a_K (dV/dx) + (da_K/dx)]$$

$$\phi_{Na} = -D_{Na} [(1/RT) F\, a_{Na} (dV/dx) + (da_{Na}/dx)]$$

$$\phi_{Cl} = -D_{Cl} [(1/RT) F\, a_{Cl} (dV/dx) + (da_{Cl}/dx)]$$

Si imponemos la condición de campo eléctrico (E) constante dentro de la membrana:

$$E = -(dV/dx) = V/\delta$$

Así la expresión para ϕ_K quedará:

$$\phi_K = -D_K[-(1/RT)Fa_K(V/\delta) + (da_K/dx)]$$

y despejando (da_K/dx) obtenemos:

$$(da_K/dx) = -(\phi_K/D_K) + (F/RT)a_K V/\delta$$

Despejando dx obtenemos:

$$dx = da_K\,[-(\phi_K/D_K) + (F/RT)\,a_K\,V/\delta\,]^{-1}$$

e integrando desde 0 hasta δ en ambos lados de la ecuación obtenemos:

$$\delta = (RT\delta/FV)[\ln((-\phi_K/D_K)+(F/RT)a_K V/\delta)]_o^{\delta}$$

donde hemos hecho uso de la integral:

$$\int d\upsilon/(a + b\upsilon) = (1/b)\ln(a + b\upsilon)$$

Evaluando los límites de integración obtenemos para δ:

$$\delta = (RT\delta/FV)\ln\{[(-\phi_K/D_K) + (F/RT)a_K\delta V/\delta] / [(-\phi_K/D_K) + (F/RT)a_{Ko} V/\delta]\}$$

y aplicando la función exponencial:

$$\exp(FV/RT) = [(-\phi_K/D_K)+(F/RT)a_K\delta V/\delta] / [(-\phi_K/D_K)+(F/RT)\,a_{Ko} V/\delta]$$

y despejando ϕ_K obtenemos:

$$\phi_K = (FV D_K/RT\delta)[(a_K\delta - a_{Ko}\exp(FV/RT)) / (1-\exp(FV/RT)]$$

Si hacemos uso de las siguientes relaciones:

$$a_{-K\delta} = \beta_K a_{Ke}$$

y

$$a_{Ko} = \beta_K a_{Ki}$$

donde β_K es el coeficiente de partición de la membrana para el potasio, y a_{Ki} y a_{Ke} son las concentraciones intracelular y extracelular de potasio, respectivamente, la ecuación para ϕ_K quedará:

$$\phi_K = (FV\,\beta_K D_K/RT\delta)[(a_{Ke} - a_{Ki}\exp(FV/RT)) / (1-\exp(FV/RT)]$$

Si expresamos la permeabilidad de la membrana al potasio como:

$$P_K = D_K\,\beta_K/\delta$$

entonces se puede reescribir como:

$$\phi_K = (FV\,P_K RT)\,[\,(a_{Ke} - a_{Ki}\exp(FV/RT)) / (1-\exp(FV/RT)\,]$$

La densidad de corriente de potasio se representa mediante:

$I_K = Z_K\,e\,\phi_K$ así que:

$$I_K = (FeV\,P_K RT)\,[\,(a_{Ke} - a_{Ki}\exp(FV/RT)) / (1-\exp(FV/RT)\,]$$

$$I_{Na} = (FeV\,P_{Na} RT)\,[\,(a_{Nae} - a_{Nai}\exp(FV/RT)\,) / (1-\exp(FV/RT)]$$

$$I_{Cl} = (FeV\,P_{Cl} RT)\,[(a_{Cli} - a_{Cle}\exp(FV/RT)\,) / (1-\exp(FV/RT)\,]$$

La corriente neta será:

$$I_{NETA} = I_K + I_{Na} + I_{Cl}$$

Así, sustituyendo las expresiones correspondientes para las corrientes obtendremos:

$$I_{NETA} = (FeV/RT)(1-\exp(FV/RT))\,[\,P_K a_{Ke} + P_{Na} a_{Nae} + P_{Cl} a_{Cli} - (P_K a_{Ki} + P_{Na} a_{Nai} + P_{Cl} a_{Cle})\exp(FV/RT)\,]$$

Si denominamos:

$$A = P_K a_{Ke} + P_{Na} a_{Nae} + P_{Cl} a_{Cli}$$

y

$$B = P_K a_{Ki} + P_{Na} a_{Nai} + P_{Cl} a_{Cle}$$

entonces la corriente neta será:

$$I_{NETA} = (Fe\ V / RT)\ (1 - exp\ (FV/ RT))\ [A - B\ exp(FV/RT)\ )$$

Si la membrana está en una situación de equilibrio, entonces $I_{NETA} = 0$. Asi necesariamente:

$$A - B\ exp\ (FV/RT) = 0$$

y despejando V obtenemos:

$$V = V_{int} - V_{ext} = (RT\ /\ F)\ ln\ [\ (P_K\ a_{Ke} + P_{Na}\ a_{Nae} + P_{Cl}\ a_{Cli})/\ (P_K\ a_{Ki} + P_{Na}\ a_{Nai} + P_{Cl}\ a_{Cle})\ ]$$

que se denomina ecuación de Goldman, Hodgkin y Katz.

5. ECUACIÓN DE LA CONDUCTANCIA

Si una membrana es permeable a diversos iones, cada uno de los cuales presenta un potencial de equilibrio (potencial de Nernst) ΔV_i, entonces el potencial de la membrana ΔV_m en una situación de equilibrio será:

$$\Delta V_m = (G_1\ \Delta V_1 + G_2\ \Delta V_2 + ... + G_n\ \Delta V_n) / (G_1 + G_2 + ... + G_n)$$

donde la G_i representa la conductancia de la membrana para un determinado ión. La ecuación anterior puede representarse también como:

$$\Delta V_m = (G_1\ \Delta V_1 / G_t) + (G_2\ \Delta V_2 / G_t) + (G_3\ \Delta V_3 / G_t)$$

donde $G_t = G_1 + G_2 + ... + G_n$ es la conductancia total de la membrana y G_i / G_t es la conductancia relativa de cada ión.

Una demostración de esta ecuación utilizando el circuito eléctrico equivalente de la membrana celular puede revisarse en la ref. 15. (Págs. 325-328). También se obtiene la misma ecuación exigiendo que la corriente neta electroquimica a través de la membrana celular sea nula. (Ver ref. 9).

6. EQUILIBRIO DE GIBBS-DONNAN

Considérese una membrana permeable a los iones potasio y cloro que separa un compartimiento que contiene K^+ y Cl^- (el exterior de la membrana) de otro que además de K^+, Cl^- contiene también un anión impermeable A^-.

Además, supongamos que el ión K^+ está más concentrado en el interior de la membrana y por ello ocurre un flujo neto del ión hacia el exterior. Cada compartimiento tiene volumen constante debido a que aún cuando la membrana se supone permeable al agua, no existe flujo neto de la misma hacia ellos. Por otro lado, la electroneutralidad de las cargas de cada compartimiento exige que en el exterior:

$$[K]_e = [Cl]_e \qquad (*)$$

y en el interior:

$$[K]_i = [Cl]_i + [A^-] \qquad (**)$$

Esto implica que cada ión potasio que se mueva hacia el exterior debe estar acompañado por un ión cloro para mantener la electroneutralidad. Esto conduce a una acumulación del ión cloro en el exterior de la membrana que crea un gradiente de concentración opuesto al del potasio. Al transcurrir el tiempo los dos potenciales de Nernst se igualarán y habremos alcanzado el equilibrio Donnan. En esta situación se cumple que:

$$V_{iK} - V_{eK} = E_K = - (RT/ F)\ ln\ ([K]_i / [K]_e)$$

$$V_{iCl} - V_{eCl} = E_{Cl} = (RT/ F)\ ln\ ([Cl]_i / [Cl]_e)$$

Asi que:

$$[K]_i\ .\ [Cl]_i = [K]_e\ .\ [Cl]_e \qquad (***)$$

que es la regla de Donnan para un par de iones de signo opuesto: «en el equilibrio Donnan, el producto de las concentraciones de los iones difusibles en un compartimiento es igual producto de los iones difusibles en el otro compartimiento».

Despejando $[Cl]_i$ de la ecuación (***) y sustituyéndola en la ecuación (**), obtenemos:

$$[K]_i = [([K]_e / [K]_i)\,[Cl]_e\,] + [A^-] \qquad (****)$$

Despejando $[Cl]_e$ de la ecuación (*) y sustituyéndola en la ecuación (****), obtenemos:

$$[K]_i = ([K]_e^2 / [K]_i\,) + [A]$$

o bien:

$$[K]_i^2 = [K]_e^2 + [A^-]\,[K]_i$$

así que en el equilibrio:

$$[K]_i > [K]_e$$

y como: $$[Cl]_e / [C1]_i = [K]_i / [K]_e$$

entonces: $$[Cl]_e > [Cl]_i$$

En general, la regla de Donnan tendrá la forma:

$$([C_1]_i / [C_1]_e)^{1/z_1} = ([C_2]_i / [C_2]_e)^{1/z_2}$$

donde C significa concentración, los subíndices 1 y 2 se refieren a las dos especies iónicas en equilibrio Donnan, i y e sus concentraciones internas y externas, y z_1, z_2 su carga.

PROBLEMAS

1. La carga neta tanto en el interior como en el exterior de la célula es nula (sin considerar la carga que existe en las superficies interna y externa de la membrana celular). Esta afirmación es conocida como Principio de Electroneutralidad.

(i) Demuestre que en términos de concentraciones iónicas esto es equivalente, en el caso de iones con diferentes cargas a:

$$\sum_k x_{ke}\,[X_{ke}] = \sum_k y_{ke}\,[Y_{ke}]$$

y

$$\sum_k x_{ki}\,[X_{ki}] = \sum_k y_{ki}\,[Y_{ki}]$$

donde x_k indica la carga del catión X_k y $[X_k]$ la concentración de tal catión. La letra e se refiere al exterior de la célula; y_k indica la carga del anión Y_k y $[Y_k]$ la concentración de tal anión. La letra i se refiere al interior de la célula.

(ii) Deduzca a partir de las expresiones anteriores las correspondientes a considerar ambos compartimientos (intracelular y extracelular) compuesto únicamente por iones monocargados.

2. Un tubo finísimo de vidrio de menos de 1 micra de diámetro externo lleno con solución salina se usa para registrar los potenciales intracelulares en células tan pequeñas que no pueden ser accesadas por otros medios. Estos microelectrodos son ejemplos de conductores iónicos. Suponga que el microelectrodo se llena con una solución acuosa de KCl de una molaridad M_1 y está sumergido en una solución de KCI de molaridad M_2. Suponiendo que μ_K y μ_{Cl} son las movilidades en agua del ión potasio y el ión cloro respectivamente. Si el potencial de difusión (también llamado potencial de punta puesto que se reduce grandemente cuando la punta se rompe) se representa como:

$$V_1 - V_2 = -(KT/e)[(\mu_K - \mu_{Cl})/(\mu_K + \mu_{Cl})]\,\ln\,(M_1/M_2)$$

Calcule su valor.

Dato: $\mu_{Cl}\,/\mu_K$ es aproximadamente 1,03.

3. Utilizando la ecuación de Gibbs-Donnan y el principio de electroneutralidad, determine las concentraciones de equilibrio, partiendo de las siguientes concentraciones iniciales para dos compartimientos A y B separados por una membrana semipermeable. Dichas concentraciones iniciales son:

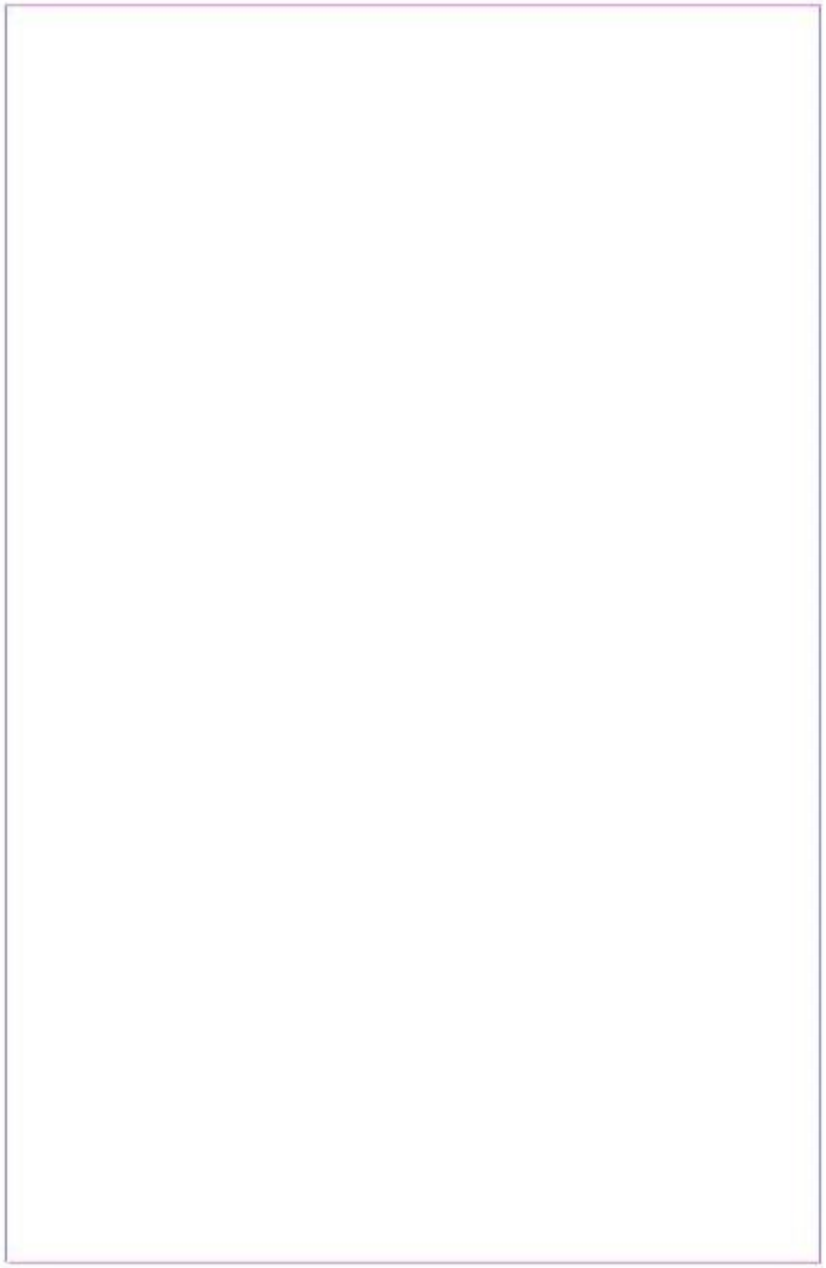
$$[K^+]_A = [K^+]_B = 0{,}1\ M$$

$$[Y^-]_A = 0{,}1M$$

$$[Cl^-]_B = 0{,}1\ M$$

BIBLIOGRAFIA DE LOS CAPÍTULOS 3, 4. 5 y 6

1. Adelman, W. Biophysics and physiology of excitable membranes. Van Nostrand Reinhold Company. EUA. 1971.
2. Aidley, D. The physiology of excitable cells. Cambridge University Press, New York. 1976.
3. Berne, R. y Levy, M. Fisiología. Mosby Year Book. 1992. España.
4. D'Alessandro Martínez, A.; Bracamonte Barán, W.; Sutil Rojas, A. Temas de biofísica y fisiología. Vol. I: Modelaje del sistema cardiovascular. Universidad Simón Bolívar, Sección de Biofísica y Bioingeniería. Unidad de Gestión de Tecnología en Salud. Caracas, 2003.
5. D'Alessandro Martínez, A.; Michinel Machado, J. L.; Ortega, Salvador, H. Introducción a la biofísica. Universidad Central de Venezuela. Ediciones de la Biblioteca EBUC. Caracas, 2002.
6. De Felice, L. Introduction to membrane noise. Plenum press. 1981. EUA.
7. Fisiología Humana de Houssay. 6ª edición. El Ateneo. Argentina. 2000.
8. Junge, D. Nerve and muscle excitation. 2da edición. Sinauer Associates. 1981. EUA.
9. Kandel, E., Schwartz, J. y Jessel, Th. Principles of neural science. 3th edition. 1991 EUA.
10. Keynes, R. y Aidley, D. Nerve and muscle. Second edition. Cambridge University Press. 1991. Gran Bretaña.
11. Lara-Estrella, L.; D'Alessandro Martínez, A.; Silva Bustillos, R.; Della Valle Zullo, P. Laboratorio de biofísica y electrofisiología. Equinoccio, USB, Caracas, 2004.
12. Matthews, G. Cellular physiology of nerve and muscle. Second edition. Blackwell scientific publications. EUA. 1991.
13. Mountcastle, V.B. Medical Physiology. 14ª edición. The CV Mosby Company, EUA. 1980.
14. Ruch, T. y Patton, H. Physiology and Biophysics. Vol.1: Excitable tissues and reflex control of muscle. 1982. W.B. Saunders Co. Twentieth edition.
15. Serway, R. y Faughn, J. Física. Pearson Education. México, 2001.
16. Stein, R. Nerve and muscle (membranes, cells and systems). Plenum Press, 1980, EUA.
17. Tippens, P. Física, conceptos y aplicaciones. McGraw-Hill Interamericana, México, 2001.
18. Wilson, J. Física. Prentice Hall. Hispanoamericana, México, 1996.



ISBN: 978-980-7565-01-1